

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут телекомунікаційних систем

Кафедра Телекомунікаційних систем

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Леонід УРИВСЬКИЙ

«___» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 172 Телекомунікації та радіотехніка

**на тему: «Технічні принципи побудови та протоколи функціонування
підсистеми радіодоступу мережі мобільного зв'язку LTE»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ТС-61

Скрябін Сергій Андрійович _____

Керівник:

Доцент кафедри ТС, доцент,

Носков Вячеслав Іванович _____

Рецензент:

Незалежний експерт з телекомунікацій, кандидат технічних наук,

Вахрушев Володимир Платонович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Телекомунікаційних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 Телекомунікації та радіотехніка

Програма професійного спрямування (спеціалізація) – «Телекомунікаційні системи та мережі»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Леонід УРИВСЬКИЙ

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Скрябіну Сергію Андрійовичу

1. Тема роботи «Технічні принципи побудови та протоколи функціонування підсистеми радіодоступу мережі мобільного зв'язку LTE», керівник роботи Носков Вячеслав Іванович, доцент, затверджені наказом по університету від 30 березня 2020 р. № 924-с.
2. Термін подання студентом роботи 12 червня 2020 року.
3. Вихідні дані до роботи: Інформаційні матеріали щодо систем мобільного зв'язку LTE. Структурований план порядку розробки матеріалів дипломної роботи.
4. Зміст роботи
Обґрунтувати актуальність теми. Розглянути та проаналізувати структуру підсистеми радіодоступу E-UTRAN її місце та функції у загальній структурі

мережі LTE. Розглянути вимоги до радіоінтерфейсу LTE та проаналізувати принцип функціонування підсистеми E-UTRAN та протоколи, що використовуються. Надати опис логічних та транспортних каналів в підсистемі. Проаналізувати процеси, що відбуваються при передачі даних від базової станції до абонентського терміналу, та описати яким чином відбувається доступ абонентських терміналів до базової станції. Проаналізувати алгоритм та технічні принципи організації процедури виділення ресурсів абонентському терміналу (процедура RACH). Виконати аналіз методів модуляції та принципів формування радіоканалів за технологією OFDMA. Проаналізувати принципи підвищення ефективності радіопідсистеми за рахунок використання технології MIMO.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо): 1) Тема та цілі дипломної роботи; 2) Структура мережі LTE; 3) Базові технічні вимоги до радіо інтерфейсу LTE; 4) Особливості обміну даними у напрямках Uplink та Downlink; 5) Процедура випадкового (довільного) доступу по каналу RACH; 6) Технологія MIMO на мережах LTE; 7) Висновки по роботі.

6. Дата видачі завдання: 13 квітня 2020 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Архітектура мережі LTE, призначення та функції її елементів. Діапазони частот та загальний принцип функціонування мережі LTE.	18.04.2020	
2	Основні технічні вимоги до радіоінтерфейсу підсистеми E-UTRAN. Загальний алгоритм функціонування підсистеми E-UTRAN. Протокол Radio-Link Control, логічні та транспортні канали.	26.04.2020	
3	Принципи передачі даних від базової станції до абонентських терміналів. Організація доступу мобільних терміналів до базової станції.	10.05.2020	
4	Алгоритм та технічні принципи організації процедури виділення ресурсів абонентському терміналу (процедура RACH)	25.05.2020	
5	Аналіз методів модуляції та принципів формування радіоканалів за технологією OFDMA. Принципи підвищення ефективності радіопідсистеми за рахунок використання технології MIMO.	30.05.2020	
6	Вступ, Висновки	02.06.2020	
7	Чистовий варіант дипломної роботи, плакати	10.06.2020	

Студент

Сергій СКРЯБІН

Керівник роботи

Вячеслав НОСКОВ

РЕФЕРАТ

Текстова частина дипломної роботи: 84 с., 37 рис., 9 табл., 13 джерел.

Мета роботи — висвітлення основних теоретичних та практичних положень щодо організації та функціонування підсистеми радіо доступу E-UTRAN, як основи для розгортання та експлуатації ділянки мережі радіо доступу.

В даній роботі розглядаються основні технічні принципи функціонування мереж LTE, вимоги, які висуваються до радіо інтерфейсу підсистеми E-UTRAN, діапазони використовуваних частот. Крім того, висвітлений основний алгоритм функціонування підсистеми радіо доступу, процес та варіанти проведення процедури випадкового доступу по каналу RACH; розглядаються представлення OFDMA – та SC-OFDM – сигналів у частотній та часовій областях, типи модуляцій, які застосовуються на мережах LTE; описані призначення та базові принципи функціонування систем багатоантенної передачі, MIMO.

СТРУКТУРА МЕРЕЖІ LTE, БАЗОВІ ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ ДО РАДІО ІНТЕРФЕЙСУ LTE, ОСОБЛИВОСТІ ОБМІНУ ДАНИМИ У НАПРЯМКАХ UPLINK ТА DOWNLINK, ПРОЦЕДУРА ВИПАДКОВОГО (ДОВІЛЬНОГО) ДОСТУПУ ПО КАНАЛУ RACH, ТЕХНОЛОГІЯ MIMO НА МЕРЕЖАХ LTE

ABSTRACT

The purpose of the work is to highlight the main theoretical and practical provisions for the organization and operation of the radio access subsystem E-UTRAN, as a basis for the deployment and operation of the radio access network.

In this work the basic technical principles of functioning of LTE networks, requirements which were put forward to the radio interface of the E-UTRAN subsystem, ranges of the used frequencies were considered. In addition, the main algorithm of operation of the radio access subsystem, the process and options for the procedure of random access on the RACH channel were reviewed; representations of OFDMA - and SC-OFDM - signals in frequency and time domains, types of modulations used on LTE networks were considered; described the purpose and basic principles of operation of multi-antenna transmission systems, MIMO.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	8
ВСТУП	12
1 АРХІТЕКТУРА МЕРЕЖІ LTE	13
1.1 Структура мережі LTE, призначення та функції її елементів	13
1.2 Діапазони використовуваних частот	17
1.3 Загальний принцип функціонування мережі LTE.....	19
1.4 Висновки з розділу 1	22
2 ПІДСИСТЕМА РАДІО ДОСТУПУ E-UTRAN	23
2.1 Основні технічні вимоги до радіо інтерфейсу.....	23
2.2 Загальний алгоритм функціонування підсистеми E-UTRAN	30
2.3 Логічні та транспортні канали.....	33
2.4 Особливості передачі даних від базової станції до мобільних терміналів.....	39
2.5 Особливості організації доступу мобільних терміналів до базової станції	43
2.7 Частотно-часова структура сигналу OFDMA.....	58
2.8 Технологія MIMO та її використання в мережах LTE	72
2.9 Висновки з розділу 2	80
ВИСНОВКИ.....	82
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	84

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

16QAM	16 Position Quadrature Amplitude Modulation – 16 – ти позиційна амплітудна модуляція
3GPP	3 rd Generation Partnership Project – організація-видавець стандартів для мереж мобільного зв'язку UMTS та LTE
64QAM	64 Position Quadrature Amplitude Modulation – 64 – х позиційна амплітудна модуляція
AIPN	All IP Network – концепція мереж, побудованих на базі протоколів IP
BTS	Base Transceiver Station – приймально-передавальна базова станція
CDF	Cumulative Distribution Function – функція розподілу випадкової величини
CDMA	Code Division Multiple Access – технологія множинного доступу із кодовим розділенням абонентів
CQI	Channel Quality Indicator – показник якості каналу
CSI	Cell State Information – показник якості обслуговування стільника
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol – протокол динамічного налаштування хосту
DRX	Discontinuous Reception – метод переривчастого прийому
eNodeB	Evolved Node Base Transceiver Station – розвинена приймально-передавальна базова станція
EPC	Evolved Packet Core – архітектура розвинутого пакетного ядра
EPS	Evolved Packet System – розвинена система передачі пакетних даних
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network – розвинена універсальна наземна система радіо доступу мереж LTE
FDD	Frequency Division Duplex – режим передачі із частотним

рознесенням смуг прийому і передачі

GERAN	GPRS EDGE Radio Access Network – мережа радіо доступу технологій GPRS та EDGE
GP	Guard Period – захисний інтервал між таймслотами радіо кадру у режимі TDD
GPRS	General Packet Radio Service – пакетна мережа радіо доступу загального користування
GSM	Global System for Mobile communication – глобальна система мобільного зв'язку
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request – гібридний алгоритм автоматичного запиту повторної передачі
HSDPA	High Speed Downlink Packet Access – технологія високошвидкісної передачі пакетів у напрямку Downlink
HSS	Home Subscriber Server – обслуговуючий абонентський сервер
HSUPA	High Speed Uplink Packet Access – технологія високошвидкісної передачі пакетів у напрямку Downlink
ISI	Inter Symbol Interference – міжсимвольна інтерференція
ITU-R	International Telecommunication Union Radio – міжнародний союз електрозв'язку, сектор радіо
LCID	Logical Channel Identity – ідентифікатор логічного каналу
LTE	Long Term Evolution – мережа довгострокового розвитку
MBMS	Multicast Broadcast System – мультимедійна ширококомовна система
MBSFN	Multicast Broadcast Single Frequency Network – мультимедійна ширококомовна система із однією робочою частотою
MIMO	Multiple Input Multiple Output – технологія багатоантенної прийомо-передачі
MME	Mobility Management Entity – блок управління мобільністю
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access – технологія

множинного доступу із ортогонально-частотним розподілом абонентів

OSI	Open System Interconnection Model – модель стеку мережевих протоколів
PCRF	Policy and Charging Rules Function – функція нарахування абонентської плати
PDCP	Packet Data Convergence Protocol – протокол конвергенції пакетних даних
PDU	Protocol Data Unit – стиснений IP-пакет із призначеним RLC порядковим номером
P-GW	Packet Gateway – пакетний шлюз
QAM	Quadrature Amplitude Modulation – квадратурна амплітудна модуляція
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying – квадратурна фазова маніпуляція
RAT	Radio Access Technology – технологія радіо доступу
RB	Resource Block – ресурсний блок
RFSP	RAT Frequency Selection Priority – пріоритет вибору робочого частого діапазону технологія радіо доступу
RNC	Radio Network Controller – контролер базових станцій мереж UMTS
RRM	Radio Resource Management – протокол управління радіо ресурсами
RX	Reception – прийом сигналу
SC-OFDM	Single Carrier Frequency Division Multiplexing – технологія множинного доступу із ортогонально-частотним розподілом абонентів на одній несучій
SDU	Service Data Unit – IP-пакет із стисненим заголовком
S-GW	Serving Gateway – обслуговуючий пакетний шлюз

SISO	Single Input Single Output – технологія одноантенної прийомо-передачі
STC	Space Time Coding – просторово-часове кодування
TA	Tracking Area – зона відслідковування у вигляді групи стільників
TAL	Tracking Area List – група зон відслідковування
TAU	Tracking Area Update – процедура оновлення зони відслідковування
TDD	Time Division Duplex – режим передачі даних із часовим поділом каналів
TF	Transport Format – формат блоку передачі, який включає його основну інформацію (довжину, тип модуляції, порядковий номер)
TX	Transmission – передача сигналу
UE	User Equipment – абонентське обладнання (термінал)
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System - універсальна мобільна телекомунікаційна система стандарту 3G
UTRA	Universal Terrestrial Radio Access – універсальний стандарт наземного радіо доступу
UTRAN	Universal Terrestrial Radio Access Network – універсальна наземна система радіо доступу мереж UMTS

ВСТУП

Наразі мережі LTE набувають досить широкого використання. Вони застосовуються для вирішення різноманітних потреб користувачів: від серфінгу Інтернет ресурсів до передачі даних системи охоронної сигналізації великого підприємства. Інженерами-експлуататорами проводиться аналіз ключових показників роботи мереж LTE із метою оптимального використання наявних ресурсів для розгортання. Науковцями проводяться дослідження методів оптимізації мереж даного типу, розглядаються варіанти розгортання мереж LTE у частотних діапазонах, задіяних під експлуатацію мереж інших типів.

Мережі LTE підпадають під стандарт 4G, вони є найсучаснішим типом мереж мобільного доступу, які широко застосовуються на комерційній основі. Відповідно, існує потреба ретельного розгляду принципів їхньої роботи, технічних вимог до складових елементів, варіантів конфігурації складових підсистеми радіодоступу, процедур, які виконуються із боку мережі та абонентського обладнання під час встановлення радіо з'єднання та обміну даними із мережею LTE.

Метою даної роботи є розгляд основних принципів організації та функціонування підсистеми радіодоступу, технічних вимог до радіо інтерфейсу, порядку виділення частотних ресурсів абонентським терміналам через проведення процедури випадкового доступу.

1 АРХІТЕКТУРА МЕРЕЖІ LTE

1.1 Структура мережі LTE, призначення та функції її елементів

Мережа LTE являє собою сукупність розвинених базових станцій (БС), eNB (Evolved Node BTS чи eNodeB), де сусідні eNodeB з'єднані між собою за допомогою інтерфейсу X2. Сукупність усіх базових станцій мережі LTE являє собою розвинену універсальну наземну мережу радіо доступу E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network). На мережі радіо доступу в якості технології множинного доступу використовується технологія OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access). Базові станції мережі даного типу під'єднуються до розвиненого пакетного ядра, EPC (Evolved packet core) через інтерфейс S1. Узагальнена архітектура мережі LTE представлена на рис. 1.1.

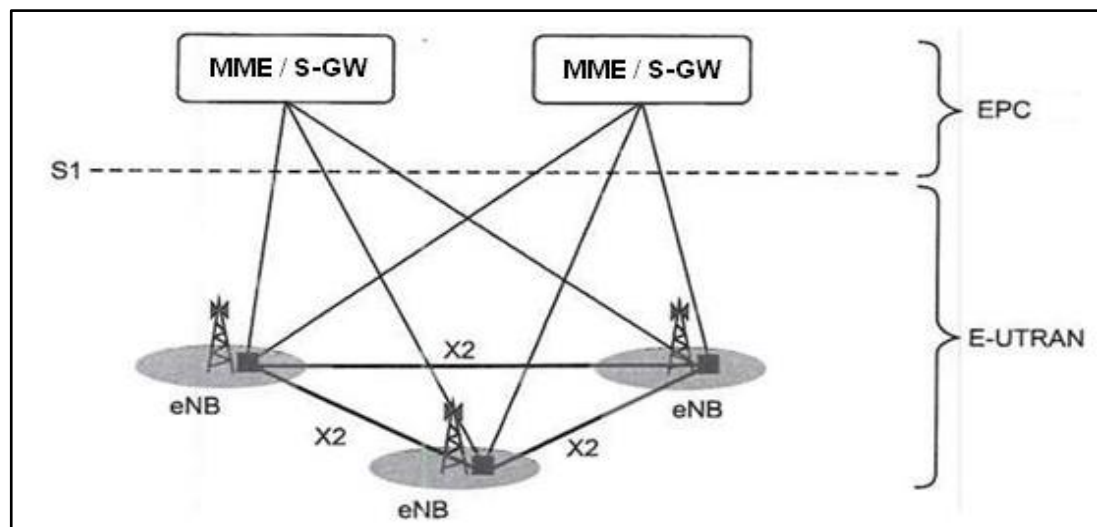


Рисунок 1.1 – Узагальнена архітектура мережі LTE

EPC складається зі шлюзів доступу, які для обслуговуваних ними базових станцій та абонентських пристроїв стають S-GW (Serving Gateway). S-GW містять програмне забезпечення по управлінню мобільністю абонентів (MME – Mobility Management Entity). Робота EPC заснована на технології IP. Таку структуру відносять до All-IP Network (AIPN).

Структура мережі LTE наведена на рис. 1.2. E-UTRAN складається з eNB (розвинутих базових станцій). eNB зазвичай складається з трьох обслуговуючих секторів. eNB можуть, але це необов'язково, бути з'єднаними між собою через інтерфейс X2. Даний інтерфейс використовується для обміну інформацією про мобільність та для балансу абонентського навантаження. eNB з'єднується з абонентським обладнанням, UE (User equipment), через радіо інтерфейс LTE-Uu. Цей інтерфейс, який ще називають повітряним, заснований на технології множинного доступу OFDMA. E-UTRAN обмінюється із UE контрольними та користувацькими повідомленнями (корисним навантаженням). Кожне з таких повідомлень відповідає за функції пов'язані з встановленням дзвінків або передачею даних. Відбувається обмін такою інформацією в межах стеку протоколів, визначених для UE та eNB. Через інтерфейс між UE та EPS, стек протоколів доступу розбивається на протоколи площини доступу (Access Stratum) і протоколи площини «не доступу» (Non-Access Stratum), тобто площини контролю.

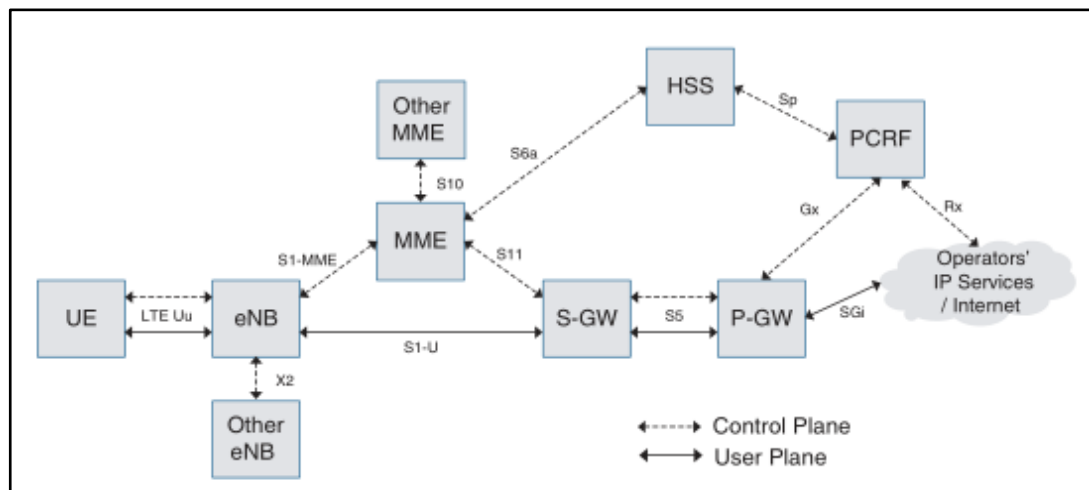


Рисунок 1.2 – Структура мережі LTE

EPS включає до свого складу MME (Mobility Management Entity), S-GW (Serving Gateway) та P-GW (Packet Gateway). Вони виконують різні функції під час процесу виклику або реєстрації в мережі. EPS та E-UTRAN

з'єднуються за допомогою інтерфейсу S1. Інтерфейси S1 підтримують зв'язок багато-до-багатьох між MME, S-GW і eNodeB. MME під'єднується до E-UTRAN через інтерфейс S1-MME, який слугує для обміну сигнальними повідомленнями між UE та EPC в процесі реєстрації абонентського пристрою у мережі оператора. Через інтерфейс S1-MME між E-UTRAN та EPC проходять сигнальні повідомлення для управління наступними процесами:

- підключення/відключення абонентського обладнання до мережі;
- підготовка/проведення естафетної передачі обслуговування між базовими станціями (Хендовера);
- передача повідомлень про стан MME та абонентського обладнання;
- передача повідомлень про надходження вхідних викликів на абонентське обладнання;
- передача абонентським обладнання інформації про стан радіо мережі (рівень сигналу на приймачі, якість сигналу).

S-GW підключений до E-UTRAN через інтерфейс S1-U. Після того, як через даний інтерфейс проходить контрольне повідомлення із інформацією про те, що EPS - з'єднання встановлено, пакети із корисною інформацією, призначеною для абонентського обладнання, починають передаватися через нього. MME та S-GW під'єднуються один до одного через інтерфейс S11 всередині архітектури EPC. Даний інтерфейс призначений виключно для передачі повідомлень управління. Корисне навантаження даним каналом не передається. Інтерфейс S5 об'єднує S-GW та PDN-GW (packet data network gateway). Через даний інтерфейс передаються як користувацькі повідомлення, так і сигнали управління. Інтерфейс S5 використовується, коли абонентське обладнання підключається до мережі LTE в межах однієї країни. Однак, коли абонент підключається до мережі свого оператора або її еквівалентній поза межами своєї країни, тобто у режимі роумінгу, використовується інтерфейс S8. Інтерфейс Gx з'єднує PCRF та P-GW. Даний інтерфейс забезпечує передачу інформації про правила опису якості надання

послуг, QoS (Quality of Service), та правила нарахування абонентської плати від PCRF до P-GW. Інтерфейс SGi пролягає між P-GW та мережею інтернет-провайдера, він еквівалентний інтерфейсу Gi у мережах GPRS. Даний інтерфейс (Gi) призначений для підключення мережі мобільного зв'язку до сторонніх мереж пакетної передачі даних.

Функції, які виконуються базовими станціями та абонентським обладнанням в мережах LTE інтуїтивно зрозумілі. Позначимо більш детально основні функції складових елементів структури мережі LTE.

Функції S-GW:

- маршрутизація пакетів даних;
- налаштування якісних показників (Quality of service, QoS) послуг, що надаються;
- буферизація пакетів інформації для абонентського обладнання, яке перебуває в режимі очікування;
- надання даних для тарифікації та оплати виконаних послуг.

Функції P-GW. Даний елемент, фактично, є якірним шлюзом для забезпечення трафіку. Якщо абонент має статичну IP-адресу, то P-GW її активує. У випадку, якщо абонент повинен отримати динамічну IP-адресу на час сеансу, P-GW робить її запит із сервера DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) або сам виконує необхідні функції DHCP, після чого виконує надання IP-адреси абоненту.

Функції MME. Керуючий блок MME, перш за все, підтримує виконання процедур протоколу Mobility Management: забезпечення безпеки системи в мережі при, цьому, інтерфейс S6a об'єднує MME із HSS (Home Subscriber Server), на якому містяться дані про абонентів даної мережі.

Функції PCRF. Policy and Charging Resource Function являє собою керуючий сервер, який забезпечує централізоване управління ресурсами мережі, облік та тарифікацію абонентських послуг. Як тільки з'являється запит на нове активне з'єднання, ця інформація надходить на PCRF. Вона

оцінює наявні в її розпорядженні ресурси мережі та передає P-GW- команди, для встановлення вимог до їх якості та їхньої тарифікації.

1.2 Діапазони використовуваних частот

Мережі LTE можуть розгортатися як у частотних діапазонах, які активно експлуатуються, так і у перспективних, використання яких ще обмежене. Можливість роботи однієї технології радіо доступу у різних частотних діапазонах не є чимось новим. Наприклад, пристрої 2G та 3G є багато частотними, здатними працювати згідно із частотними планами різних регіонів Земної кулі, та підтримувати міжнародний роумінг. Здебільшого, специфікації до імплементації тієї чи іншої технології радіо доступу не визначають певний частотний діапазон її роботи. Частіше за все, вирішення даного питання обумовлюється політикою держави в плані використання радіо частотного ресурсу, ліцензіями на величину максимальної електромагнітної енергії, що може перетинати вільний простір у тих чи інших місцях. Частоти, на яких працює обладнання мережі радіо доступу LTE, можуть бути із парним та непарним спектром; відповідно до цього абонентські пристрої та базові станції LTE можуть працювати в режимі TDD (Time Division Duplex) та FDD (Frequency Division Duplex). Реліз 13 специфікації 3GPP включає 32 частотних діапазони для FDD та 12 для TDD. Парні частоти для режиму роботи частотного дуплексу нумеруються від 1 до 32 та від 65 до 66, як показано в табл. 1.1, в той же час, непарні частоти для режиму роботи часового дуплекса нумеруються від 33 до 46, як це показано в табл. 1.2 [1]. Деякі частотні діапазони частково або повністю перетинаються. У більшості випадків це пояснюється регіональними розходженнями у визначенні та впровадженні частотних планів, відповідно до настанов ITU-R. У даних таблицях під Америкою розуміють одразу Північну та Латинську. Під Європою усі європейські країни. Позначка «Н/В» у таблиці означає, що даний частотний діапазон наразі не задіяний під розгортання мереж LTE.

Таблиця 1.1 – Парні частотні діапазони (Uplink-Downlink) визначені 3GPP для LTE

Діапазон	Діапазон напрямку Uplink (МГц)	Діапазон напрямку Downlink (МГц)	Регіон застосування
1	1920-1980	2110-2170	Європа, Азія
2	1850-1910	1930-1990	Америка, Азія
3	1710-1785	1805-1880	Європа, Азія, Америка
4	1710-1755	2110-2155	Америка
5	824-849	869-894	Америка, Азія
6	830-840	875-885	Тільки Японія (UTRA)
7	2500-2570	2620-2690	Європа, Азія
8	880-915	925-960	Європа, Азія
9	1749.9-1784.9	1844.9-1879.9	Японія
10	1710-1770	2110-2170	Америка
11	1427.9-1447.9	1475.9-1495.9	Японія
12	698-716	728-746	Америка
13	717-187	746-756	Америка
14	788-798	758-768	Америка
17	704-716	734-746	Америка
18	815-830	860-875	Японія
19	830-845	875-890	Японія
20	832-862	791-821	Європа
21	1447.9-1462.9	1495.9-1510.9	Японія
22	3410-3490	3510-3590	Європа
23	2000-2020	2180-2200	Америка
24	1626.5-1660.5	1525-1559	Америка
25	1850-1915	1930-1995	Америка
26	814-849	859-894	Америка
27	807-824	852-869	Америка
28	703-748	758-803	Азія
29	Н/В	717-728	Америка
30	2305-2315	2350-2360	Америка
31	452.5-457.5	462.5-467.5	Америка
32	Н/В	1452-1496	Європа
65	1920-2010	2110-2200	Європа
66	1710-1780	2110-2200	Америка
67	Н/В	738-758	Європа

З першу наведені вище частоти були виділені для радіо зв'язку ITU-R. Вже згодом даний набір частот був призначений для побудови мереж четвертого покоління у 8 релізі 3GPP.

Таблиця 1.2 – Непарні частотні діапазони визначені 3GPP для LTE

Діапазон	Частотний діапазон (МГц)	Регіон застосування
33	1900-1920	Європа, Азія
34	2010-2025	Європа, Азія
35	1850-1910	Америка
36	1930-1990	Америка
37	1910-1930	Н/В
38	2570-2620	Європа
39	1880-1920	Китай
40	2300-2400	Європа, Азія
41	2496-2690	Америка
42	3400-3600	Європа
43	3600-3800	Європа
44	703-803	Азія
45	1447-1467	Азія, Китай
46	5150-5925	Глобальний

На даний момент, в Україні, мережі LTE працюють в межах 3 та 7 частотних діапазонів режиму частотного дуплекса (FDD), це відповідає частотним діапазоном Uplink: 1710-1785 МГц, 2500-2570 МГц; Downlink: 1805-1880 МГц, 2620-2690 МГц відповідно. Наразі розглядається можливість редистриб'юції частот із діапазону 900 МГц для імплементації мереж LTE у сільській місцевості.

1.3 Загальний принцип функціонування мережі LTE

Система обміну даними між абонентом і базовою станцією організована за допомогою традиційного ортогонально-частотного мультиплексування OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access),

яке є досить ефективним способом організації множинного доступу абонентів. Завдяки відносно великій тривалості OFDMA - символу у поєднанні із циклічним префіксом, сигнали мережі радіо доступу є досить стійкими до міжсимвольної інтерференції. Тому, OFDMA із самого початку була досить привабливою для застосування на мережах LTE, основою яких є висока ширина смуги частот каналу та багатоантенна передача даних із застосуванням технології MIMO. Ортогонально-частотне мультиплексування забезпечує деякі додаткові переваги для мереж LTE, а саме:

- OFDMA робить можливим більш гнучкий доступ до налаштувань частотного домену мережі. Таким способом, стає можливою побудова частотно-залежних схем передачі даних, на відміну від, наприклад, CDMA у UMTS, із часово-залежними схемами передачі даних.
- більш гнучке підлаштування ширини смуги каналу, задля роботи у різних смугах частот, виділених для побудови мереж LTE.

Напрямок Uplink (від абонента до базової станції) також побудований із застосуванням OFDMA. Таким чином, передача даних у напрямку «від абонента» функціонує аналогічно напрямку Downlink. Суттєвим є те, що у Downlink базова станція підтримує одночасну роботу багатьох несучих, таким чином витрачаючи багато електроенергії. Енергетичні ресурси абонентського обладнання обмежуються ємністю акумуляторної батареї. Задля економії електроенергії, напрямок Uplink працює із застосуванням технології SC-OFDM (Single Carrier Orthogonal Frequency Division Multiplexing), основною відмінністю якої є побудова сигналу для передачі на одній широкосмуговій несучій, завдяки чому вдається зберігати енергію акумулятора мобільного пристрою через скорочення вихідної потужності передавача.

Однією з ключових характеристик мобільного радіозв'язку є стрімка зміна стану каналу передачі, який залежить від селективного загасання частоти, втрат на розповсюдженні, від відстані, перешкод, процесу естафетної передачі обслуговування до стільників та наявності сигналу від

інших терміналів. Натомість, інженери намагаються боротися з цими змінами стану через, наприклад, управління потужністю, LTE намагається компенсувати ці зміни через застосування динамічного переключення абонентів між різними частотними діапазонами передачі даних. Динамічний перерозподіл ресурсів між користувачами дуже добре підходить для забезпечення найкращих радіо умов передачі даних, щоб зробити можливим застосування, наприклад, модуляції більш високого порядку, зменшити кількість пошкоджених пакетів даних.

Система побудови схем передачі даних контролює процес виділення частого ресурсу користувачам, залежно від того, з яким саме сервісом вони працюють, тобто яка швидкість передачі даних їм потрібна. Тому адаптація швидкості обміну даними (динамічне підлаштування швидкості передачі даних, залежно від швидкості роботи наданого сервісу та стану каналу обміну даними) є досить важливим компонентом нормальної роботи мережі LTE. Однак, навіть якщо процес підлаштування швидкості обміну даними проходить успішно, в будь-якому випадку має місце наявність деякої кількості пошкоджених пакетів на прийомі базової станції. Задля регулювання кількості помилок передачі пакетів інформації, на мережах LTE використовується механізм швидкого перезапиту пошкоджених пакетів ARQ (Automatic Repeat Request). Даний механізм дозволяє значно зменшити вплив наявності пошкоджених пакетів, що передаються між абонентом і базовою станцією. Також, застосовується надлишкове кодування повідомлень, яке дозволяє коригувати бітові помилки переданих пакетів даних.

Контролер схем передачі даних (планувальник) є ключовим елементом роботи системи LTE. Робота напрямків Uplink та Downlink повністю базується на роботі даного елемента. Завдяки OFDMA, контролер схем обміну даними проводить частотно-залежне планування передачі даних, залежно від стану радіо каналу та кількості обслуговуваних абонентів. Для підтримки стабільної роботи напрямку Downlink, обслуговуваний пристрій

надсилає до базової станції повідомлення про стан каналу у частотному та часовому доменах (про завмирання та інтерференцію). Стан каналу в мережах LTE оцінюють через виміри рівня пілотного каналу (Reference Signal) у напрямку від базової станції до абонента. Таким чином, контролер побудови схем передачі даних виконує аналіз повідомлень про стан каналу, CSI (Channel State Information), та розподіляє наявний частотний ресурс каналу між користувачами, беручи до уваги, яким сервісом вони користуються. В загальному випадку, одному абонентському пристрою виділяється смуга шириною 180 КГц, тривалість одного OFDMA-символу в якій складає 1 мілісекунду.

Стан каналу передачі даних береться до уваги контролером побудови схем передачі даних не лише у напрямку Downlink, а й в Uplink. Задля цього, абонентський пристрій передає до базової станції призначену йому послідовність біт через пілотний канал. Таким чином, планувальник на базовій станції може зробити CSI звіт та надіслати його на абонентський пристрій, для подальшого збільшення його вихідної потужності або внесення надлишковості у повідомлення, що передаються, з метою зменшення числа бітових помилок у пакетах. Таким чином, у загальному випадку, організована робота мережі LTE.

1.4 Висновки з розділу 1

У даному розділі були розглянуті основні положення щодо архітектури мереж LTE. Були визначені частотні діапазони, у межах яких розгортають мережі даного типу, режими використання частотного ресурсу абонентами: частотного та часового дуплексу. Крім того, були висвітлені відомості щодо загальних принципів функціонування мережі LTE, функції елементів архітектури, призначення інтерфейсів між елементами архітектури.

2 ПІДСИСТЕМА РАДІО ДОСТУПУ E-UTRAN

2.1 Основні технічні вимоги до радіо інтерфейсу

Перші технічні вимоги до LTE, сформульовані у звіті TR 25.913, визначили, в свою чергу, вимоги до мережі радіо доступу E-UTRAN, яка входить до мережі LTE.

Перша вимога – максимальні (пікові) швидкості передачі даних (peak data rates):

- 100 Мбіт/с у напрямку Downlink при ширині робочої смуги частот каналу 20 МГц (спектральна ефективність 5 біт/с/Гц);
- 50 Мбіт/с у напрямку Uplink при ширині робочої смуги частот каналу 20 МГц (спектральна ефективність 2,5 біт/с/Гц).

Ці вимоги можна реалізувати, якщо спектр сигналу збільшити (порівняно із мережею доступу UTRAN) у чотири рази (з 5 до 20 МГц) та застосувати технологію MIMO. Значення пікової швидкості передачі даних та спектральної ефективності для мережі E-UTRAN в режимі FDD/TDD та в режимі TDD, сумісному із кадровою структурою мережі UTRAN при її роботі із низкою швидкістю маніпуляції (LCR (Least Cost Routing) – формат маршрутизації по найменшій вартості), наведені у табл. 2.1 та 2.2 [2]. Ці значення можна отримати, якщо використовувати технологію MIMO, два передавачі TX, модуляцію 64QAM, швидкість кодування R, рівну одиниці у напрямку Downlink, а також один передавач TX UE, модуляцію 16QAM та ту саму швидкість кодування для напрямку Uplink.

Таблиця 2.1

Потрібне значення пікової швидкості та спектральної ефективності	Downlink		Uplink	
	2 TX, MIMO, 64QAM, R = 1, 10% службових сигналів		1 TX UE, 16QAM, R = 1, 10% службових сигналів	
	(1)Мбіт/с у смузі 20 МГц	(2)Мбіт/с/Гц	(1)Мбіт/с у смузі 20 МГц	(2)Мбіт/с/Гц
Без врахування службової інформації та заголовків	100	5,0	50	2,5

Продовження таблиці 2.1

Потрібне значення пікової швидкості та спектральної ефективності	Downlink		Uplink	
	2 TX, MIMO, 64QAM, R = 1, 10% службових сигналів		1 TX UE, 16QAM, R = 1, 10% службових сигналів	
	(1)Мбіт/с у смузі 20 МГц	(2)Мбіт/с/Гц	(1)Мбіт/с у смузі 20 МГц	(2)Мбіт/с/Гц
Із врахуванням службової інформації (циклічних префіксів, захисних інтервалів по часу та частоті, контрольних символів)	182	9,1	57	2,9
Із врахуванням заголовків протоколів L1 та L2 (29% службової інформації)	144	7,2	48	2,4

Таблиця 2.2

Потрібне значення пікової швидкості та спектральної ефективності	Downlink		Uplink	
	2 TX, MIMO, 64QAM, R = 1		1 TX UE, 16QAM, R = 1	
	(1)Мбіт/с у смузі 20 МГц	(2)Мбіт/с/Гц	(1)Мбіт/с у смузі 20 МГц	(2)Мбіт/с/Гц
Без врахування службової інформації та заголовків	100	5,0	50	2,5
Із врахуванням циклічних префіксів по Downlink (22% службових даних та даних рівня L1/L2)	149	7,5	49,8	2,5
Із врахуванням циклічних префіксів по Downlink (25% службових даних та даних рівня L1/L2)	128	6,4		

При розрахунках пікової швидкості передачі даних врахована кадрова структура напрямків Uplink та Downlink (циклічні префікси, часові та частотні захисні інтервали, контрольні символи), види модуляції та

завадостійкого кодування. Крім того, враховувались службові заголовки та повідомлення протоколів фізичного та канального рівнів L1 та L2 (повідомлення планування передач інформації, повідомлення протоколу повтору передачі HARQ, повідомлення абонентського терміналу про виміри якості каналу – Channel Quality Indicator - CQI).

У табл. 2.1 та 2.2 наведені значення пікової швидкості передачі даних у напрямках Uplink та Downlink в умовах сприятливих радіо умов, коли відношення сигнал/шум (C/I) більше 20 дБ та можна використовувати багатопозиційні різновиди модуляції – 16QAM, 64QAM. Погіршення у відношенні сигнал/шум, C/I, призводить до зменшення пікової швидкості передачі (Рис.3 – для Downlink, Рис.4 – для Uplink). Як показано на рисунку 2.1 та 2.2, пікова швидкість передачі даних залежить від характеристик завадостійкості, алгоритму прийому та обробки сигналу.

На рисунках позначено:

- R – швидкість завадостійкого кодування;
- MMSE (Minimum Mean Squared Error) – лінійне детектування MIMO – сигналів за критерієм мінімуму середньоквадратичної помилки;
- QRM – MLD із використанням ASESS (Adaptive Selection of Surviving Symbol Replica Candidates) – адаптивне нелінійне детектування MIMO сигналів за критерієм максимуму правдоподібності.

Знаючи потрібне відношення сигнал/шум та потужність передачі сигналу, можна визначити пікові швидкості передачі даних на різних віддаленнях від базової станції.

Другою вимогою є те, що ємність мережі E-UTRAN: не менше 200 користувачів на стільник у активному режимі при ширині спектру сигналу 5 МГц.

Третя вимога – це час затримки передачі пакетів даних на рівні протоколів управління (control-plane latency):

- час переходу мобільного терміналу із неробочого стану IDLE у робочій стан CELL_DCH менше 100 мс;

- час переходу мобільного термінала із режиму очікування CELL_PCH у робочій стан CELL_DCH менше 50 мс.

Четверта вимога – це час затримки передачі пакетів даних користувача (user-plane latency): менше 5 мс у активному стані мобільного термінала при завантаженні IP-пакетів мінімальних розмірів (для одного користувача із одним потоком даних).

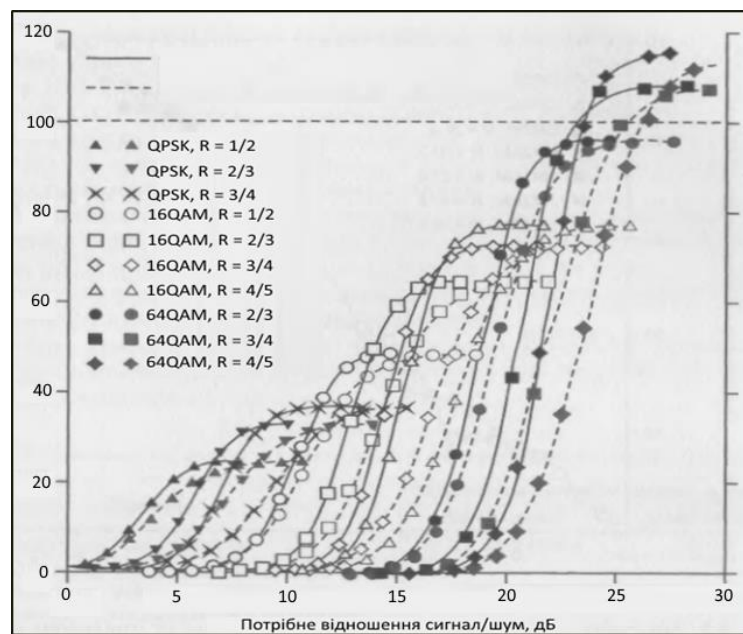


Рисунок 2.1 – Залежність пікової швидкості передачі даних від відношення сигнал/шум у напрямку Downlink каналу шириною смуги 20 МГц (мобільність абонента до 3 км/год)

Невеликий час затримки передачі пакетів даних потрібний для надання сучасних послуг у реальному масштабі часу мережами стільникового зв'язку, які функціонують по принципу комутації пакетів.

Час затримки пакетів даних користувача із рівня IP одного вузла мережі (мобільного термінала, шлюза) на IP – рівень іншого вузла мережі складається із часу затримки на різних етапах передачі даних (табл. 2.3 [3]). Сумарний середній час затримки передачі пакетів для протоколів площини користувача при передачі даних для мережі E-UTRAN дорівнює 4,0 мс (включаючи затримку передачі між базовою станцією та шлюзом мережі).

Скорочення цієї затримки до 1,0 мс є метою створення радіоінтерфейсу в рамках проекту WINNER.

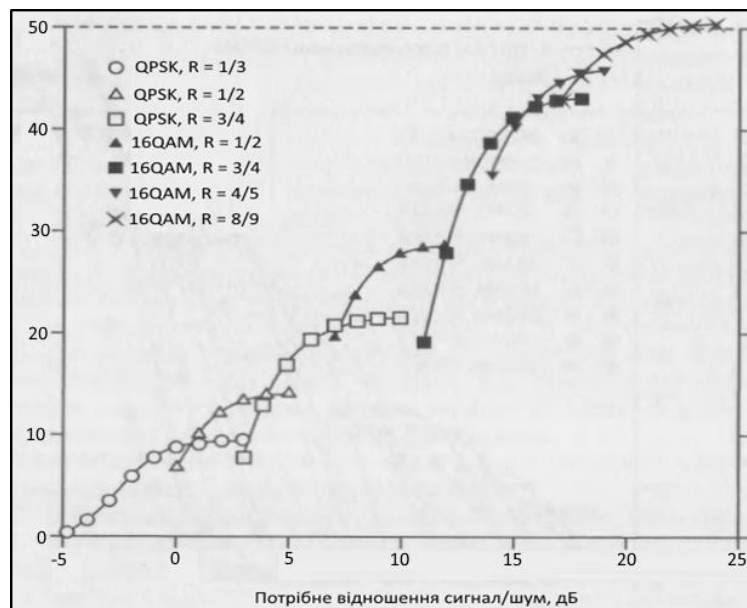


Рисунок 2.2 – Залежність пікової швидкості передачі даних від відношення сигнал/шум у напрямку Uplink каналу із шириною смуги пропускання 20 МГц (мобільність до 3 км/год)

Таблиця 2.3

Етап передачі даних	Опис етапу	Час затримки, мс
0	Активізація терміналу	Не враховується
1	Обробка завдання передачі пакетів даних процесором терміналу	1
2	Циклова синхронізація	0,25
3	Тривалість часу передачі	0,5
4	Виконання алгоритму ретрансляції HARQ	0,3x2,5
5	Обробка завдання передачі пакетів даних процесором базової станції	1
6	Передача пакету даних між базовою станцією та шлюзом aGW	1...15 (T_{slu})
7	Обробка завдання процесором шлюза	0,5
Загальна затримка		4 мс + T_{slu}

П'ята вимога – це швидкість передачі даних користувача (user throughput):

- у напрямку Downlink у 3 – 4 рази вище, ніж при використанні технології HSDPA у UMTS та при двох співпадаючих антенах базових станцій та двох приймальних антенах абонентських терміналів;
- у напрямку Uplink у 2 – 3 рази вище, ніж при використанні технології HSUPA та при одній передавальній антені абонентських терміналів та двох приймальних антенах базових станцій.

Шоста вимога - ефективність використання спектру (спектральна ефективність):

- у напрямку Downlink у 3 – 4 рази вище, ніж при використанні технології HSDPA в умовах повного завантаження мережі;
- у напрямку Uplink у 2 – 3 рази вище, ніж при використанні технології HSUPA в умовах повного завантаження мережі.

Параметри спектральної ефективності мережі E-UTRAN наведені у табл. 2.4 (для абонентів із низькою мобільністю та при несучих частотах радіосигналу у діапазоні 2 ГГц) [4].

Таблиця 2.4

Параметр	Абсолютне значення параметру, біт/с/Гц	
	Downlink	Uplink
Середня спектральна ефективність	До 2,6 (2x2 MIMO)	До 0,9
Середня спектральна ефективність на одного користувача у стільнику (точка 5% на інтегральній функції розподілу (CDF) користувацької пропускної здатності)	До 0,27	До 0,15

Сьома вимога – мобільність абонентів у мережі E-UTRAN:

- низька (швидкість переміщення 0...15 км/год);
- висока (швидкість переміщення 15...120 км/год);

- надвисока (швидкість переміщення 120...350 км/год, максимально до 500 км/год).

Восьма вимога – радіус стільників:

- до 5 км при забезпеченні максимальної пропускної здатності, спектральної ефективності та мобільності;
- до 30 км при погіршенні цих параметрів.

Дев'ята вимога – застосування технології мобільного широкомовлення (Multimedia Broadcast Multicast Service - MBMS):

- зниження технологічної складності абонентських терміналів – використання однакових видів модуляції, кодування, множинного доступу, однакових смуг частот каналів в мережі для режимів Multicast та Unicast;
- одночасне надання користувачу послуг широкомовлення MBMS та передачі голосу;
- доступність для технології широкомовлення парних (в режимі FDD) та непарних (в режимі TDD) спектральних смуг.

Десята вимога - гнучкість використання радіоспектру:

- використання адаптивних каналів із шириною смуги 1,4; 3; 5; 10; 15; 20 МГц у напрямках Downlink та Uplink;
- забезпечення гнучкості використання радіоспектру в режимі тільки у напрямку Downlink та в режимі у напрямках Downlink та Uplink.

Одинадцята вимога – сумісність мережі E-UTRAN із іншими мережами 3GPP:

- сумісність у одній географічній зоні та одночасне використання каналів мереж E-UTRAN та мереж GERAN/UTRAN;
- абонентське обладнання E-UTRAN, яке підтримує мережі GERAN та/або UTRAN, забезпечує міжмережеву естафетну передачу обслуговування (хендовер);
- тривалість переривання обслуговування у процесі виконання хендоверу між мережами E-UTRAN та UTRAN (або GERAN) для надання послуг

у реальному масштабі часу (real-time) не повинна перевищувати 300 мс;

- тривалість переривання обслуговування у процесі виконання естафетної передачі обслуговування між мережами E-UTRAN та UTRAN (або GERAN) для надання послуг, інваріантних до часу (non real-time), не повинна перевищувати 500 мс.

2.2 Загальний алгоритм функціонування підсистеми E-UTRAN

Мережа радіо доступу E-UTRAN розглянута у ряді технічних специфікацій, згідно із якими вона складається тільки із базових станцій eNB (evolved Node Base Transciever Station). Базові станції eNodeB є елементами повнозв'язної мережі E-UTRAN та з'єднані між собою по принципу «кожен-із-кожним», за допомогою інтерфейсу X2. Інтерфейс X2 підтримує естафетну передачу обслуговування мобільного терміналу (хендовер) у стані LTE_ACTIVE. Кожна базова станція з'єднана через інтерфейс S1 із мережею EPS, побудованою за принципом комутації пакетів.

Базові станції eNodeB мережі E-UTRAN виконують функції управління радіо ресурсами – RRM (Radio Resource Management): управління радіоканалами (Radio Bearer Control); управління доступом (Radio Admission Control); управління мобільністю (Connection Mobility Control); динамічний розподіл ресурсів (Dynamic Resource Allocation). Таким чином, у мережі радіо доступу E-UTRAN базові станції eNodeB керують протоколами радіо інтерфейсу, комбінуючи виконання функцій базових станцій eNodeB та більшість функцій контролера RNC мережі UMTS.

Управління радіо ресурсами мережі E-UTRAN (Inter Cell RRM) забезпечує управління ресурсами групи стільників із метою підвищення ефективності використання частотного спектру та мінімізації завадостійкого взаємного впливу абонентських пристроїв та базових станцій, а також підтримку мобільності.

Управління службою передачі даних у радіоканалі (RB control) реалізовано у базових станціях eNodeB мережі E-UTRAN та забезпечує встановлення, підтримку та вивільнення радіоканалів передачі даних із заданими параметрами в мережі E-UTRAN. Основними задачами стають контроль та управління усіма сесіями передачі даних із врахуванням параметрів якості послуг – QoS (Quality of Service), виділення ресурсів для знов активованих сесій.

Управління мобільністю (Connection Mobility Control) дозволяє вибирати обслуговуючу базову станцію eNodeB для мобільного терміналу, передавати обслуговування мобільного терміналу від однієї базової станції eNodeB до іншої (хендовер). Вибір обслуговуючої eNodeB проводиться мобільним терміналом на основі власних вимірів у стані RRC_CONNECTED та порівняння отриманих вимірів із встановленими пороговими значеннями. Хендовер реалізований на основі аналізу вимірів як мобільного терміналу, так і базової станції eNodeB, а також поточного завантаження на обслуговуючий та сусідній із ним стільник, політики оператора по регулювання трафіку.

За допомогою функції управління мобільністю забезпечується відслідковування розташування мобільного терміналу у мережі E-UTRAN із точністю до однієї зони місце розташування терміналу, TA (Tracking Area), або групи зон місце розташування у відповідності із переліком зон розташування, TAL (Tracking Area List). Дана функція передбачає ще декілька функцій.

Функції управління мобільністю терміналу в режимі ECM – IDLE. Режим ECM – IDLE (EPS Connection Management IDLE) характеризується відсутністю активного з'єднання мобільного терміналу із мережею LTE, при якому забезпечується передача пакетів даних користувача. У даному режимі розташування мобільного терміналу в мережі E-UTRAN відоме модулю MME із точністю до групи зон розташування згідно із TAL.

Функція управління переліком зон (треків) розташування мобільного терміналу у мережі E-UTRAN дозволяє мережі EPC запам'ятати та актуалізувати не одну зону розташування мобільного терміналу, TA, а групу зон місце розташування, в залежності від накопиченої статистики пересування абонента, що, зрештою, дозволить зменшити частоту виконання процедури оновлення даних про місце розташування TAU.

Функція управління хендовером у мережі E-UTRAN дозволяє забезпечити безперервність IP – сесії користувача, при переміщенні мобільного терміналу між базовими станціями eNodeB. Управління хендовером проводиться мережевим елементом MME, який виступає функціональним модулем прив'язки внутрішньо мережевої мобільності (Inter – eNodeB Mobility Anchor).

Функція обмеження мобільності дозволяє обмежити мобільність терміналу та виконується наступними елементами мережі LTE: мобільним терміналом, мережею радіо доступу E-UTRAN та EPC. Обмеження мобільності абонентського терміналу, який знаходиться у режимі ECM – IDLE, реалізується мобільним терміналом на основі інформації, отриманої від мережі EPC. Обмеження мобільності абонентського обладнання, який знаходиться у режимі ECM – CONNECTED, виконується безпосередньо мережею радіо доступу E-UTRAN та EPC на основі переліку обмежень естафетної передачі обслуговування.

Функція управління радіо ресурсами мережі пов'язана із розподілом ресурсів мережі E-UTRAN між мобільними терміналами. Стратегія мережі E-UTRAN по управлінню радіо ресурсами заснована на інформації про конкретні типи абонентів, мобільних терміналів та додатків.

Для підтримки управління радіо ресурсами у мережі E-UTRAN модуль MME забезпечує передачу базовій станції eNodeB через інтерфейс S1 параметру RFSP (RAT/Frequency Selection Priority), який визначає пріоритет вибору радіо технології та пріоритет вибору частоти. Параметр RFSP використовується базовою станцією для реалізації стратегії мережі по

управлінню радіо ресурсами. Значення параметру є індивідуальним для абонентського терміналу та використовується усіма службами обміну даними мережі радіо доступу E-UTRAN у наступних випадках:

- для перевибору стільника мобільними терміналами в режимі IDLE у відповідності із встановленим пріоритетом;
- для прийняття рішення по переводу мобільних терміналів, які знаходяться в активному режимі (active mode), на інші частотні канали чи інші технології радіо доступу.

2.3 Логічні та транспортні канали

В мережах LTE існують канали трьох рівнів: логічні, фізичні, транспортні. Повідомлення, якими обмінюються абонентське обладнання та мережа класифікують як SDU (Service Data Unit). Перед передачею по радіо інтерфейсу, SDU оброблюють (фрагментують, впорядковують, шифрують) на рівні протоколів PDCP та RLC, розподіляючи по логічним каналам у вигляді PDU (Protocol Data Unit). Логічні канали визначаються за типом інформації, яку вони переносять, та, головним чином, вони класифікуються як канали контролю, які використовуються для передачі інформації щодо налаштувань та конфігурації мережі LTE. Крім того, логічними каналами може передаватися й користувацька інформація.

Програмне забезпечення рівня MAC (Medium Access Control) діє під керуванням контролера схем передачі (планувальника), передає PDU на фізичний рівень, де виконується їхнє кодування, скремблінг, мультиплексування, модуляція, та передача через транспортні канали. Після чого відбувається передача пакетів даних по фізичним каналам радіо інтерфейсу.

Набір логічних каналів, визначених у мережах LTE, включає:

- broadcast Control Channel (BCCH) – широкомовний канал, по якому передають системну інформацію усім абонентським пристроям даного

стільника. Перед входом у систему, мобільний термінал повинен зчитати інформацію каналу BCCH та визначити параметри мережі, починаючи зі смуги робочих частот;

- paging Control Channel (PCCH) – канал посилки пейджингових повідомлень (повідомлення посилки виклику абоненту та відповіді абонентського терміналу про готовність прийому виклику); використовується для абонентського обладнання, місцезнаходження якого не визначено із точністю до стільника. Сигнал пейджинга передають одночасно у всі стільники зони відстеження, TA (Tracking Area);
- common Control Channel (CCCH) – канал типу «точка-багатоточка» для передачі інформації управління у напрямку Downlink;
- dedicated Traffic Channel (DTCH) – індивідуальний канал для передачі трафіку одного користувача; абонент отримує окремі виділені канали для передачі інформації по Downlink та Uplink;
- dedicated Control Channel (DCCH) – індивідуальний виділений канал управління по Downlink та Uplink для обміну повідомленнями управління із абонентським обладнанням;
- multicast Control Channel (MCCH) – канал групової передачі службової інформації. Використовується для передачі службової інформації, необхідної при прийомі сигналів каналу MTCH;
- multicast Traffic Channel (MTCH) – канал передачі трафіку, виділений для групи абонентів. Використовується для передачі по Downlink послуги мультимедійного мовлення MBMS;
- the single – cell Multicast Traffic Channel (SC – MTCH) – використовується для передачі даних MBMS (Multicast Broadcast Multimedia Services) по Downlink в межах одного стільника;
- the sidelink Broadcast Control Channel (SBCCH) – канал, який використовується для синхронізації абонентського обладнання у даному стільнику;

- the sidelink Traffic Channel (STCH) – використовується для утворення прямого з'єднання «пристрій-пристрій» в межах даного стільника (sidelink – «побічне» з'єднання, використовується для прямого з'єднання абонентського обладнання в межах даного стільника, подібно до Downlink та Uplink, при підключенні абонентського пристрою до обслуговуючої базової станції).

Як і при передачі пакетної інформації в мережах GSM/UMTS, інформаційні повідомлення на транспортному рівні формують в транспортні блоки. В кожному часовому інтервалі передачі, TTI (Transmission Time Interval), по радіо інтерфейсу передають хоча б один транспортний блок деякого розміру. При використанні технології просторового мультиплексування (MIMO) можлива передача двох або чотирьох блоків в одному TTI.

Кожному транспортному блоку, при його передачі по радіо інтерфейсу, визначають транспортний формат (TF – Transport Format). Транспортний формат включає у себе інформацію про розмір транспортного блоку, тип модуляції, використовуваних антенних технологіях. Разом із повідомленням про призначення ресурсу розміщується повідомлення про параметри надлишкового кодування. На рівні MAC можуть реалізовуватися різноманітні конфігурації швидкості передачі даних, шляхом зміни транспортних форматів, тому керування швидкостями зводиться до вибору транспортного каналу.

Набір транспортних каналів, визначений для мереж LTE включає:

- the Broadcast Channel (BCH) – транспортний широкомовний канал; має фіксований транспортний формат. Канал використовується для передачі частини інформації логічного каналу (BCCH);
- the Paging Channel (PCH) – транспортний пейджинговий канал для передачі пейджингової інформації (посилки виклику та готовності до його прийому) логічного каналу PCCH. Канал PCH підтримує прийом із перериваннями (Discontinuous Reception-DRX), що дозволяє

абонентському обладнанню більш раціонально використовувати заряд батареї, оскільки воно приймає сигнали PCN тільки у визначені моменти часу;

- the Downlink Shared Channel (DL-SCH) – канал із розподілом користувачів по Downlink. Цей транспортний канал використовують в E-UTRAN для передачі інформації по Downlink. Він підтримує такі особливості LTE, як адаптацію зміни швидкості та диспетчеризацію пакетів у часовій та частотній областях, HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) – модифікований автоматичний запит на повторну передачу неприйнятих пакетів, та просторовий розподіл каналів. Також він підтримує DRX, щоб якомога довше зберігати заряд батареї мобільного терміналу. Для передачі по цьому каналу використовується динамічне або напівдинамічне виділення каналного ресурсу;
- the Multicast Channel (MCH) – канал групової передачі, використовується для підтримки послуги мультимедійного ширококомовлення, MBMS. Він характеризується напівстатичним форматом транспорту та напівстатичним виділенням ресурсів. При передачі мультимедійного ширококомовлення, у декількох сусідніх стільниках застосовують технологію MBSFN (Multicast Broadcast a Single Frequency Network). При цьому, конфігурація розподілу та формату передач по MCH узгоджена у стільниках, де реалізовується MBSFN;
- the Uplink Shared Channel (UL-SCH) – канал із розділенням користувачів по Uplink, аналогічний до каналу із розділенням користувачів по Downlink, DL-SCH;
- the sidelink Shared Channel (SL-SCH) – транспортний канал, що використовується для комунікації в межах «побічного з'єднання»;
- the sidelink Broadcast Channel (SL-BCH) – транспортний канал, який використовується для синхронізації в межах «побічного з'єднання»;

- the sidelink Discovery Channel (SL-DCH) – транспортний канал, що використовується для тестування утвореного «побічного з'єднання».

Взаємозв'язок між каналами для Downlink наведений на рис. 2.3, а для Uplink – на рис. 2.4.

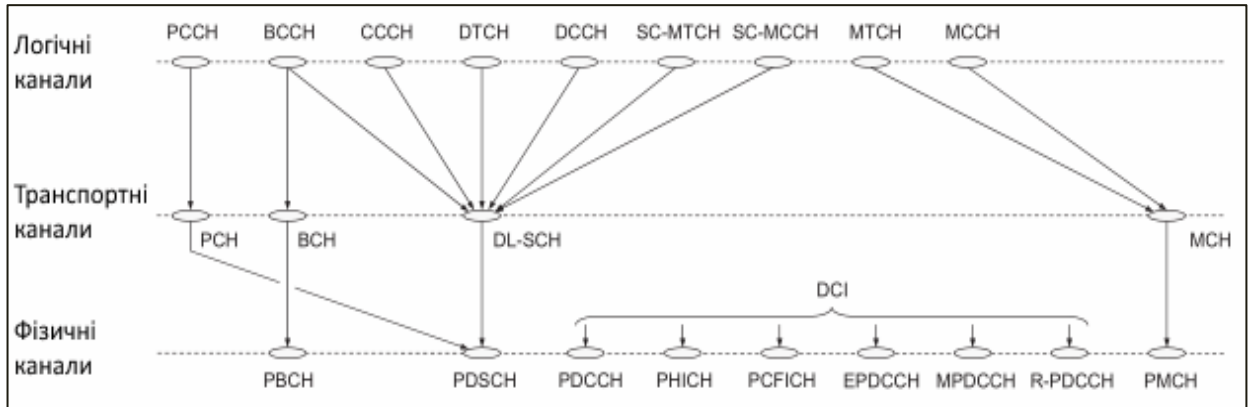


Рисунок 2.3 – Взаємозв'язок між типами каналів у мережах LTE, у Downlink

Крім того, канал випадкового доступу, RACH (Random Access Channel), також відноситься до транспортних каналів, хоча по ньому не переносяться транспортні блоки.

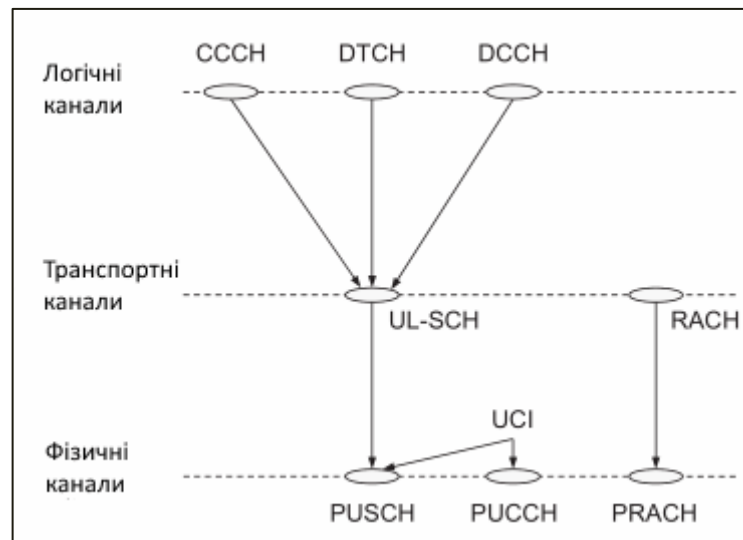


Рисунок 2.4 – Взаємозв'язок між типами каналів у мережах LTE, у Uplink

Із представлених малюнків можна легко зрозуміти, що канали UL-SCH та DL-SCH позиціонуються як ключові транспортні канали у Uplink та

Downlink відповідно. Для підтримання пріоритезації, групи логічних каналів, кожній з яких призначений власний блок RLC, можуть мультиплексуватися в один транспортний канал рівня MAC. На приймальній стороні, на рівні MAC, відбувається демультимплексування та пересилка PDU на відповідні їм блоки RLC для послідовностей повідомлень, які надходять. Для підтримання процесу нормального мультиплексування повідомлень на приймачі, у передані послідовності додають MAC – заголовок зі структурою, зображеною на рис. 2.5.

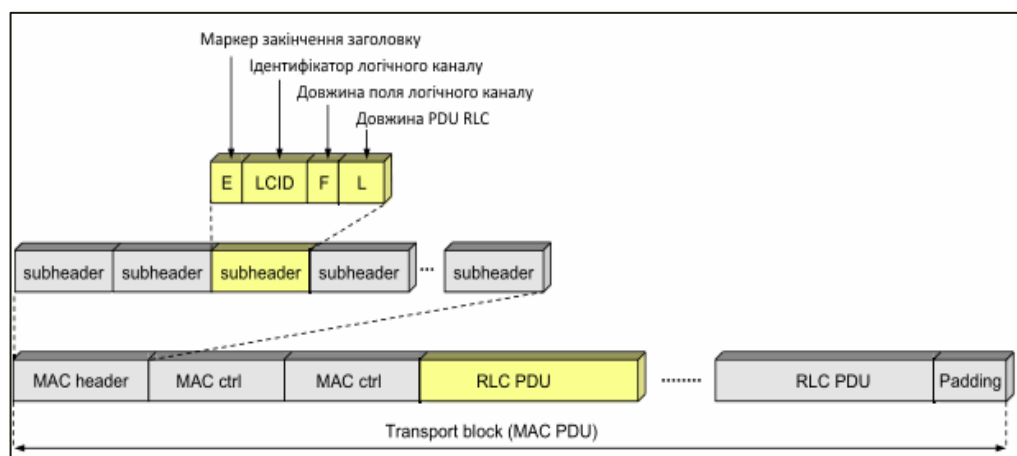


Рисунок 2.5 – Структура заголовку MAC

Кожному PDU RLC відповідає свій підзаголовок заголовка MAC. Підзаголовок містить ідентифікатор логічного каналу, LCID (Logical Channel Identity), із яким пов'язана довжина PDU в байтах. Також, у підзаголовку присутня мітка довжини поля логічного каналу, яка визначає, чи останній це підзаголовок. Так, один або декілька PDU RLC, разом із MAC – заголовком, та, в разі необхідності, із іншою системною інформацією, складають транспортний блок та передаються на фізичний рівень. Крім мультиплексування різних логічних каналів, MAC – рівень також здатний вводити MAC контрольні елементи у транспортні блоки, для передачі по транспортних каналах. Контрольні елементи MAC використовуються для вхідної контрольної сигналізації. Контрольні елементи визначаються

зарезервованими значеннями у LCID – полі, де значення LCID визначає тип контрольної інформації.

2.4 Особливості передачі даних від базової станції до мобільних терміналів

Особливістю радіо інтерфейсу у напрямку Downlink мережі E-UTRAN є використання технології множинного доступу OFDMA, яка дозволяє гнучко розподіляти та масштабувати радіо ресурси для каналів передачі даних із різною смугою пропускання. Інтервал часу передачі, TTI, у напрямку Downlink дорівнює тривалості таймслота, тобто 0,5 мс. При цьому, забезпечується невеликий час очікування та висока ефективність планування передачі пакетів даних по радіо інтерфейсу.

У напрямку Downlink використовують наступні різновиди модуляції: QPSK, 16QAM, 64QAM. Крім того, у Downlink можливе використання MIMO – технології багатоантенної передачі. Максимально можливим є використання чотирьох передавальних антен базової станції та двох або чотирьох антен абонентського терміналу. Технологія MIMO забезпечує передачу даних як багатьох користувачів, MU-MIMO (Multi User MIMO), так і одного користувача, SU-MIMO (Single User MIMO).

Для Downlink мережі E-UTRAN визначено три фізичних канали:

- physical Downlink Shared Channel (PDSCH) – загальний транспортний фізичний канал напрямку Downlink;
- physical Downlink Control Channel (PDCCH) – фізичний канал управління Downlink;
- common Control Physical Channel (CCPCH) – загальний фізичний канал управління напрямку Downlink.

Канал PDSCH призначений для передачі даних та мультимедіа з високою швидкістю. Канал PDCCH передає специфічну інформацію управління абонентськими терміналами та використовує тільки модуляцію

QPSK. Цей канал займає перші три OFDMA – символи в першому таймслоті кожного субкадра. Канал ССРСН передає службову широкомовну інформацію. Ним використовується тільки модуляція QPSK.

Технологія ортогонального частотного мультиплексування, OFDMA, базується на формуванні багаточастотного сигналу, який складається із багатьох піднесучих частот, які відрізняються одна від одної на величину $\Delta f = |\omega_n - \omega_{n-1}|/2\pi$, обрану із умови ортогональності сигналів на сусідніх піднесучих частотах ($\omega_n - n$ – та радіальна піднесуча частота).

При формуванні OFDMA – сигналу потік послідовності інформаційних символів довжиною T_u/N розділяється на блоки, які містять N символів (T_u – тривалість одного символу). Далі блок послідовних інформаційних символів перетворюється на блок паралельних символів, в якому кожен інформаційний символ відповідає деякій піднесучій багаточастотного сигналу. При цьому, тривалість символу збільшується в N – разів. Таким чином, сумарна ширина спектру багаточастотного сигналу відповідає ширині спектру вихідного сигналу із паралельним розташуванням символів. Метою такого перетворення є захист сигналу від вузькосмугових завад (або від часткових викривлень спектру у результаті перевідбиття та багатопроменевого розповсюдження). Захист досягається завдяки тому, що паралельні символи багаточастотного сигналу являють собою кодове слово завадостійкого коду (наприклад, коду Ріда – Соломона), який дозволяє відновити символи у випадку їхнього помилкового прийому через дію завад.

Крім того, перевагою OFDMA – сигналу є зменшення необхідної кількості часових захисних інтервалів. При сигналі із послідовними символами (одночастотний сигнал), захисні інтервали додають між кожним символом, а при сигналі із паралельними символами (при багаточастотному сигналі) – між групами символів (OFDMA – символами). Особливості OFDMA – сигналів полягають у наступному:

- мультиплексування сигналів на під несучих частотах, модульованих інформаційними символами за обраним законом (QPSK, 16QAM, 64QAM);
- ортогональність сигналів на під несучих частотах (взаємна кореляційна функція дорівнює нулеві) або, принаймні, їхня квазі – ортогональність;
- кожен OFDMA – символ має захисний часовий інтервал для виключення між символної інтерференції, який обирається з врахуваннями імпульсної характеристики сигналу (фізичного середовища розповсюдження радіосигналу).

Схема формування OFDMA – сигналу зображена на рис. 2.6.

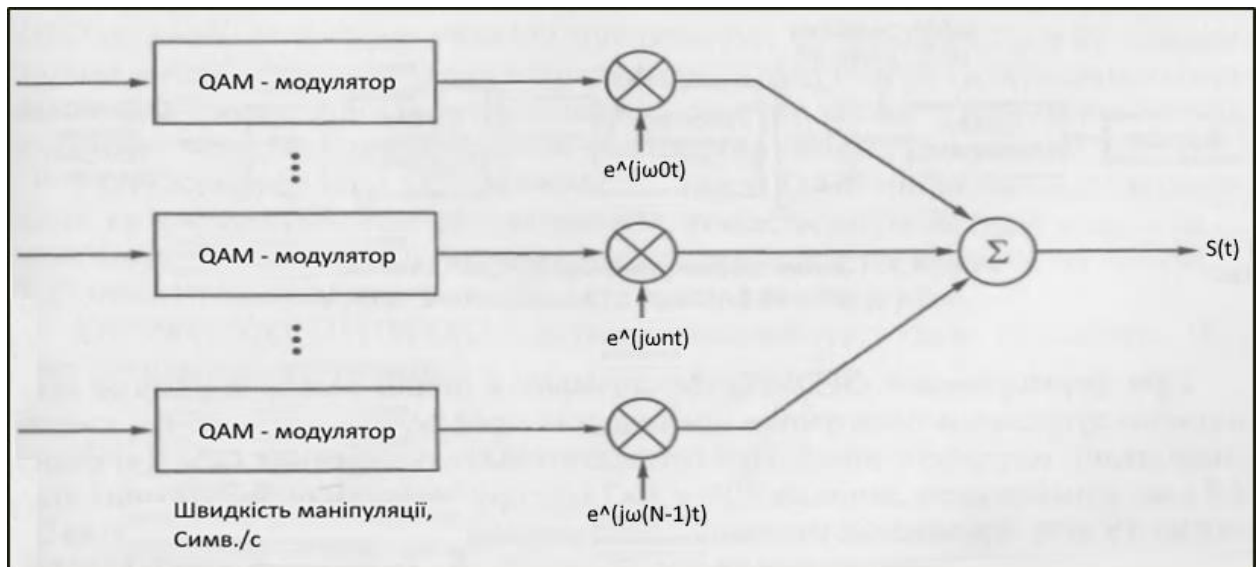


Рисунок 2.6 – Схема формування OFDMA – сигналу

На практиці, при формуванні OFDMA/QAM – сигналу використовують дискретне зворотне швидке перетворення Фур'є (ДШПФ) на N точок. Такий підхід значним чином спрощує практичну реалізацію приймально-передавального пристрою із модуляцією OFDMA/QAM. Схема формування OFDMA/QAM – сигналу в передавачі базової станції мережі E-UTRAN наведена на рис. 2.7.

Крім традиційної для LTE модуляції OFDMA/QAM, можливе використання модуляції OFDMA/OQAM. Перспективна модуляція OFDMA/OQAM, на відміну від OFDMA/QAM, не потребує наявності циклічних префіксів ($T_{CP} = 0$). Квадратурна амплітудна модуляція із зсувом OQAM (Offset QAM) значно підвищує ефективність використання спектру за рахунок зменшення інтерференції міжсимвольних завад та ущільнення сигналу по часу.

При формуванні OFDMA/OQAM – сигналу QAM – символи розділяються на дві комплексні складові: речову та уявну, причому уявна частина зсувається по часу на величину T_u відносно речової. Важливою відмінністю OFDMA/OQAM - сигналу від класичного OFDMA/QAM – сигналу є те, що при OFDMA/OQAM – сигналі швидкість передачі символів подвоюється ($\tau_0 = T_u/2$). Схема формування OFDMA/OQAM – сигналу в передавачі базової станції мережі E-UTRAN представлена на рис. 2.8. У даній схемі QAM – модулятор генерує N дійсних символів тривалістю $\tau_0 = T_u/2$. Далі (до блока ЗШПФ) вони мультиплексуються.



Рисунок 2.8 – Схема формування OFDMA/OQAM – сигналу у передавачі базової станції мережі LTE

2.5 Особливості організації доступу мобільних терміналів до базової станції

Особливістю радіо інтерфейсу у напрямку Uplink мережі E-UTRAN є використання технології множинного доступу із однією несучою частотою, SC-FDMA (Single Carrier Frequency Division Multiple Access). Виключення

взаємного впливу користувачів досягається за рахунок введення циклічних префіксів та використання ефективних еквалайзерів у приймальних пристроях. Інтервал часу передачі, TTI, у напрямку Uplink мережі E-UTRAN відповідає TTI напрямку Downlink і дорівнює 0,5 мс. Цей інтервал можна збільшити для спеціальних типів каналів. Основна конфігурація антен напрямку Uplink, при використанні технології MIMO передбачує наявність двох передавальних антен на мобільному пристрої та двох приймальних антен на базовій станції. Технологія множинного доступу SC-FDMA базується на перетворенні Фур'є (Рис.15).

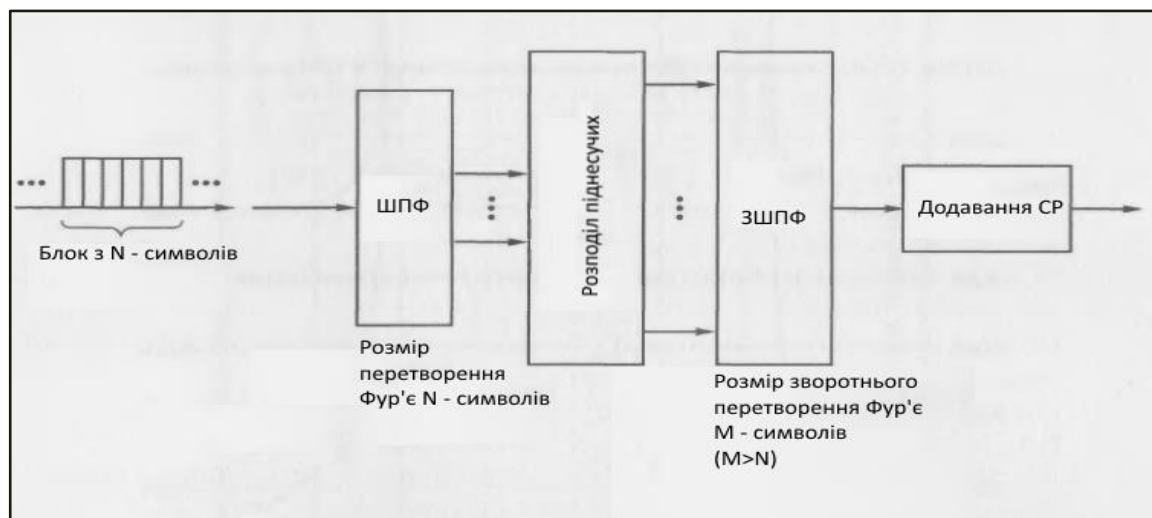


Рисунок 2.9 – Схема передавального пристрою при множинному доступі SC-FDMA у мережі LTE: CP – циклічний префікс

При формуванні групового сигналу у напрямку Uplink (Рис.15), для кожного терміналу вирішується питання про те, яка частина під несучих використовується (заповнюється даними), а яка – ні (заповнюється нулями). Між кожним із сигналів, утворюваних після швидкого перетворення Фур'є, розміщується $L-1$ нульових символів; L – кількість нульових символів. При послідовному розподілі під несучих $L = 1$ (Рис.16 - а), тобто між символами, утворюваними після швидкого перетворення Фур'є, не розміщуються нульові під несучі ($L-1 = 0$). При змішаному розподілі $L > 1$ (Рис.16 - б).

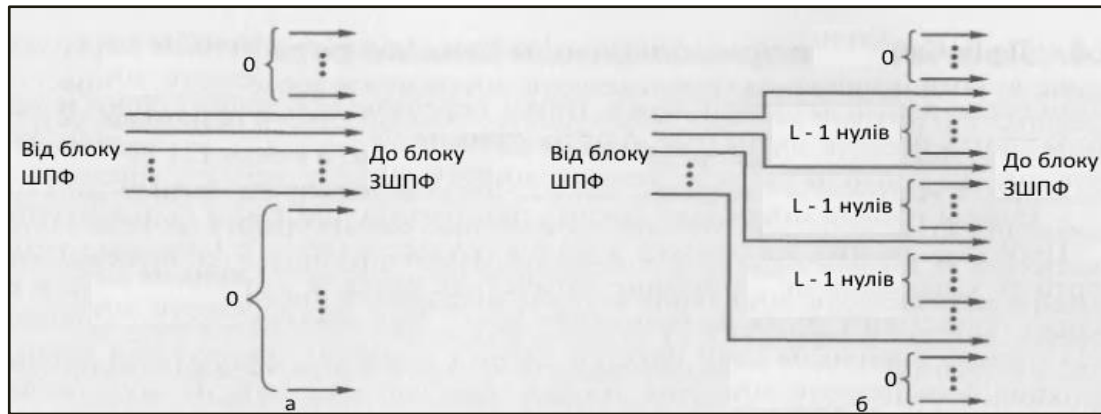


Рисунок 2.10 – Схема формування під несучих OFDMA – сигналу:

а – послідовний розподіл піднесучих; б – змішаний розподіл піднесучих.

Для напрямку Uplink мережі E-UTRAN визначено три фізичних канали:

- physical Random Access Channel (PRACH) – фізичний канал випадкового (довільного) доступу;
- physical Uplink Control Channel (PUCCH) – фізичний канал управління напрямку Uplink;
- physical Uplink Shared Channel (PUSCH) – фізичний розподілений транспортний канал напрямку Uplink.

2.6 Алгоритм та технічні принципи організації процедури виділення ресурсів абонентському терміналу (процедура RACH)

Фундаментальною вимогою до будь-якої стільникової системи є можливість абонентського пристрою виконати запит на встановлення з'єднання, яка, головним чином, спирається на процедуру випадкового доступу. У мережах LTE випадковий доступ, здебільшого, використовується для декількох цілей, включаючи:

- початковий доступ у процесі встановлення радіо з'єднання (перехід із режиму роботи RRC_IDLE до RRC_CONNECTED);
- повторне виконання встановлення радіо з'єднання після його обриву;

- для виконання естафетної передачі обслуговування (хендовер) у процесі встановлення синхронізації по Uplink;
- для встановлення синхронізації по Uplink, якщо обмін даними у напрямку Uplink чи Downlink відбувається, коли абонентський пристрій працює у режимі RRC_CONNECTED без синхронізації;
- для визначення розташування абонентського терміналу на основі вимірів сигналів напрямку Uplink;
- для запиту на планування передачі в разі, якщо жоден запит на планування не був сконфігурований по каналу PUSCH.

Визначення таймслоту по Uplink є поєднуючою ланкою усіх зазначених цілей; у процесі встановлення радіо з'єднання (перехід із режиму RRC_IDLE до RRC_CONNECTED) процедура випадкового доступу включає у себе надання мобільному пристрою унікального ідентифікатора, C-RNTI.

Таким чином, можливі дві передумови виконання процедури випадкового доступу: встановлення синхронізації для вже встановленого радіо з'єднання або перехід із режиму очікування у режим передачі даних. Основу процедури випадкового доступу складають чотири етапи, проілюстровані на рис. 2.11.

Перший – передача мобільним пристроєм преамбули випадкового доступу, яка дозволяє цільовій базовій станції визначити, у якому часовому інтервалі буде відбуватися обмін даними із конкретним пристроєм. Синхронізація по напрямку Uplink у такому випадку є необхідністю, оскільки без цього абонентський термінал не буде спроможним передавати дані у напрямках Uplink та Downlink.

Другий – передача базовою станцією команди на виділення абонентському терміналу часового інтервалу передачі, яка базується на результатах першого етапу процедури випадкового доступу.

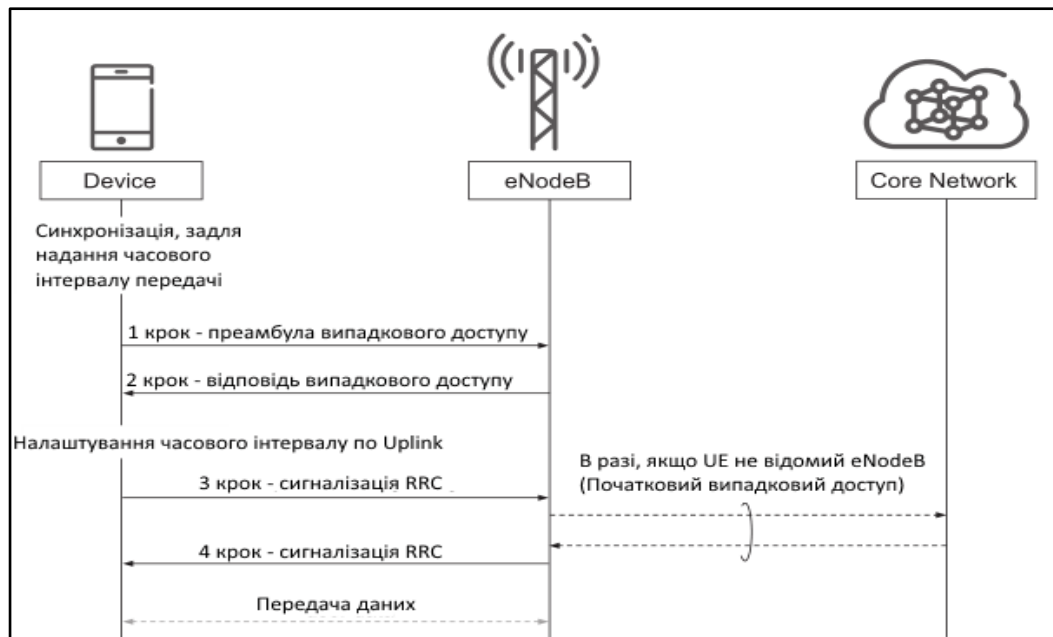


Рисунок 2.11 – Огляд процедури випадкового доступу

Третій – передача абонентським пристроєм ідентифікатора мобільного терміналу до мережі через канал UL-SCH. Зміст даного ідентифікатора залежить від статусу мобільного терміналу, зокрема відомий мережі даний термінал чи ні.

Четвертий – передача із мережі мобільному терміналу відповіді по каналу DL-SCH. Зміст даного повідомлення залежить від кількості абонентських пристроїв, які одночасно підключаються до мережі через один і той самий канал випадкового доступу.

Тільки на першому кроці відбувається фізична обробка, спеціально призначена для каналу випадкового доступу. Як наслідок, кожен із етапів процедури випадкового доступу опишемо більш детально. Як мобільний термінал, так і базова станція може бути ініціатором процедури випадкового доступу. У випадку, коли ініціатором виступає базова станція, використовується повідомлення PDCCCH. Повідомлення PDCCCH є спеціальним повідомленням, яке передається по каналу PDCCCH, та містить інформацію про час проведення процедури випадкового доступу. Повідомлення PDCCCH, головним чином, використовуються для повторного

встановлення синхронізації по Uplink, проте, вони так само можуть використовуватися і для інших цілей.

Головною метою передачі преамбули випадкового доступу (перший етап даної процедури) є визначення базовою станцією наявності спроби підключення випадкового доступу та оцінка затримки на розповсюдженні між абонентським терміналом та базовою станцією.

Частотно – часовим ресурсом, на якому передається преамбула випадкового доступу є первинний канал випадкового доступу, PRACH (Primary Random Access Channel). Мережа виконує широкомовлення інформації про те, у якому ресурсному блоці транслюється первинний канал випадкового доступу, всередині SIB- 2. Як частина першого етапу випадкового доступу, абонентський термінал обирає одну преамбулу, для передачі по PRACH. Для кожного стільника доступно 64 послідовності, які можуть передаватися в якості преамбули. Дві послідовності із 64 наявних позначають як системну інформацію. У процесі виконання процедури випадкового доступу під час вже наявного з'єднання для передачі даних, абонентський пристрій обирає одну із двох послідовностей, виділених для системної інформації. В залежності від того, як довго абонентський пристрій буде виконувати процедуру випадкового доступу, використовуючи одну й ту саму послідовність в якості преамбули, базова станція, із великою ймовірністю, буде без проблем детектувати його присутність.

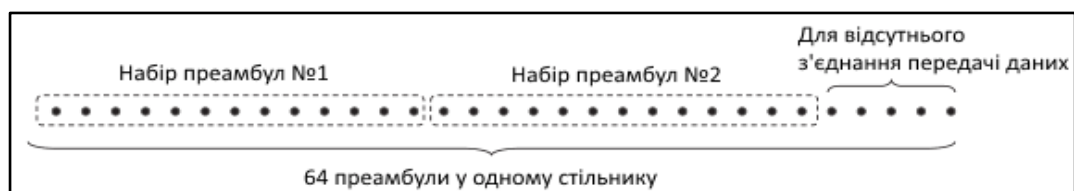


Рисунок 2.11 – Набори преамбул

Варіант вибору послідовності для преамбули залежить від того, яка кількість даних буде передаватися абонентським пристроєм по каналу UL-SCH на третьому етапі процедури випадкового доступу. В результаті,

залежно від преамбули, яку використовує абонентський термінал, базова станція надасть вказівку щодо виділення частотного ресурсу у напрямку Uplink абонентському пристрою. Якщо мобільний термінал робить запит на виконання процедури випадкового доступу із наявним радіо з'єднанням для передачі даних, наприклад, для хендоверу до іншого стільника, преамбула явно визначається базовою станцією. Для уникнення колізій, базова станція підбирає послідовності для преамбул із варіантів поза межами послідовностей для службової інформації. У частотній області (представлено на рис. 2.12) ресурс PRACH має ширину смуги, яка відповідає шести ресурсним блокам (1,08 МГц). Такий варіант виділення частот під канал випадкового доступу досить добре підходить для стільників, для напрямку Uplink яких виділена вузька смуга частот. У часовій області тривалість преамбули залежить від того, як вона сконфігурована. Базова тривалість ресурсу випадкового доступу складає 1 мілісекунду, однак можлива конфігурація преамбули більшої тривалості. Також слід зазначити, що планувальник передачі напрямку Uplink, в загальному випадку, може проводити обов'язкове резервування частотного ресурсу під преамбулу випадкового доступу великої тривалості, через уникнення використання одного і того самого частотного каналу PRACH багатьма абонентськими пристроями.



Рисунок 2.12 – Схематична ілюстрація передачі преамбули випадкового доступу

В загальному випадку, планувальник обслуговуючої базової станції напрямку Uplink уникає того, щоб передача абонентської інформації проводилася на частотах, виділених під канал випадкового доступу, як результат, піднесучі, виділені із цією метою, ортогональні до решти ресурсних блоків. Такий підхід дозволяє зменшити інтерференцію по каналу UL-SCH та по каналу випадкового доступу від різних абонентських терміналів. Однак, специфікації до побудови мереж 4G не обмежують планувальник у проведенні передачі даних в межах частотного ресурсу, виділеного під PRACH.

Для режиму роботи FDD під канал випадкового доступу спеціально виділяється область, одна на субкадр, тому абоненти, від яких надходять заявки на випадковий доступ, не перетинаються у частотній області. З точки зору затримки, набагато кращим було б перерозподілити ресурс PRACH у часовому домені, для мінімізації середнього часу перетікання процесу випадкового доступу.

Для режиму роботи TDD можливий варіант виділення декількох спеціальних частотних областей в межах одного субкадру. Причиною такого підходу є менша кількість кадрів напрямку Uplink у TDD. Для підтримання такої ж ємності каналу випадкового доступу, як у FDD, мультиплексування абонентських терміналів у частотному домені інколи є необхідним. Кількість частотних областей може конфігуруватися. Вона варіюється в межах від однієї на 20 мілісекунд передачі до однієї на 1 мілісекунду для FDD; для TDD до 6 частотних областей кожні 10 мілісекунд. Преамбула складається із двох частин:

- послідовності преамбули;
- циклічного префікса.

Крім того, у складі преамбули присутній захисний часовий інтервал. Основним для початку процедури випадкового доступу є налагодження синхронізації напрямку Downlink, яке є результатом процедури пошуку потрібного стільника. Етап встановлення синхронізації із знайденим

стілником є необхідним, оскільки без цього неможливе виділення абонентському пристрою часового інтервалу для передачі даних. Для уникнення інтерференції між абонентськими пристроями по каналу випадкового доступу, використовується захисний інтервал передачі, тому тривалість преамбули, зазвичай, менше 1 мс.

Додавання до преамбули випадкового доступу циклічного префікса є вигідним із точки зору полегшення обробки у частотній області сигналу на приймачі базової станції. Бажано, щоб тривалість циклічного префікса була приблизно рівною тривалості захисного інтервалу. Якщо тривалість преамбули складає приблизно 0,8 мс, то до її складу входять циклічний префікс та захисний інтервал із тривалостями 0,1 мс та 0,1 мс відповідно.

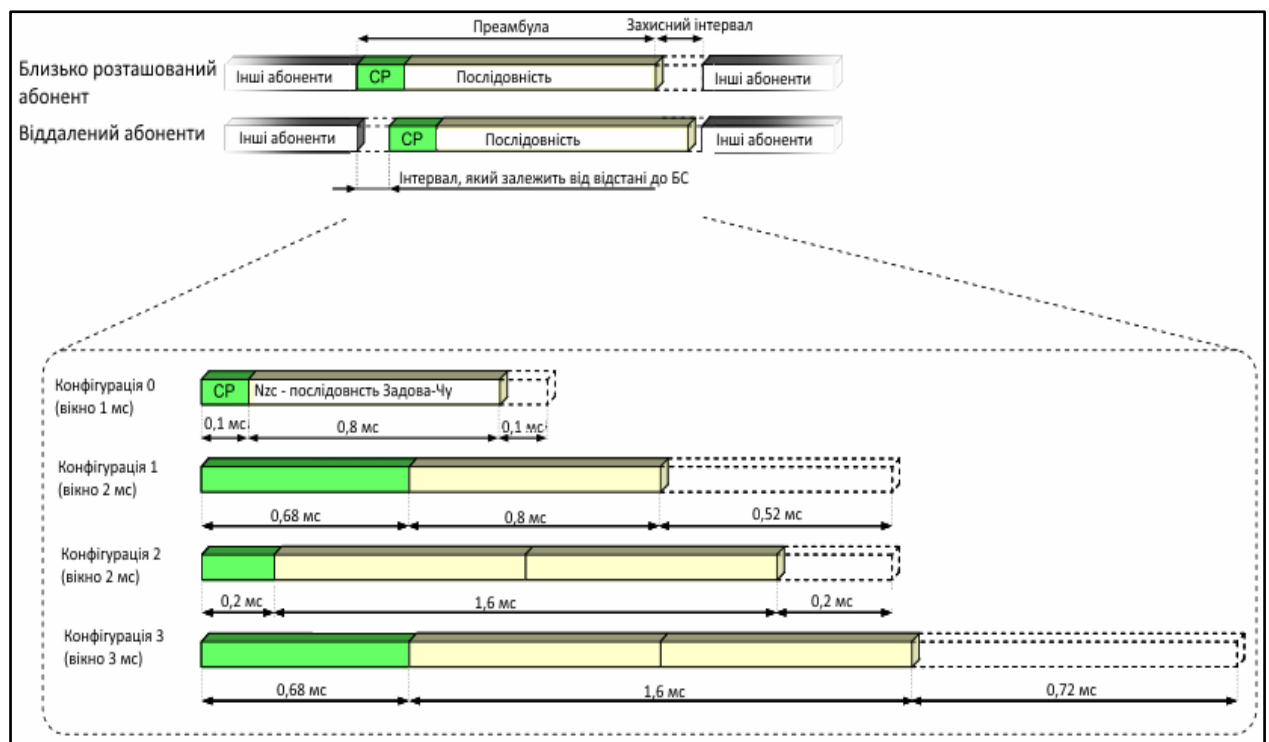


Рисунок 2.13 – Різні формати преамбули

Дана конфігурація відповідає 0 на рис. 2.13 та застосовується для стільників, радіусом дії до 15 км. Для стільників із більшим радіусом дії, де присутні більші затримки сигналу на розповсюдженні, застосовуються формати преамбул 1 – 3. Інформація про конфігурацію преамбули у

стілнику передається в ефір, як системна інформація. Крім того, можливе налаштування захисних інтервалів більшої тривалості, якщо у межах ресурсів, виділених для каналу випадкового доступу не проводиться передача абонентських даних.

Формати преамбул, наведені на рис. 2.14, можуть застосовуватися як у режимі роботи FDD, так і у TDD. Однак, існує четвертий, додатковий формат преамбули, який використовується виключно для TDD. У рамках цього формату, преамбула випадкового доступу передається у часовому інтервалі початку передачі у напрямку Uplink, UpPTS (Uplink Pilot Timeslot), спеціального субкадру, замість передачі у субкадрі, який переносить абонентські дані. Оскільки даний часовий інтервал має тривалість, яка відповідає тривалості лише двох OFDMA – символів, сама преамбула, циклічний префікс та захисний інтервал будуть значно коротшими. Відповідно, четвертий формат преамбули використовується лише для стільників із малої канальною ємністю та радіусом дії. Оскільки передача преамбули відбувається у межах UpPTS, сусідні базові станції можуть створювати інтерференцію одна одній у цьому короткому часовому інтервалі.

Основою утворюючим фактором при налаштуванні рівня потужності преамбули випадкового доступу є оцінка втрат на розповсюдженні опорних сигналів цільового стільника. Із цієї оцінки формується початкове значення потужності преамбули PRACH, яке підбирається через додавання певного потужнісного зсуву.

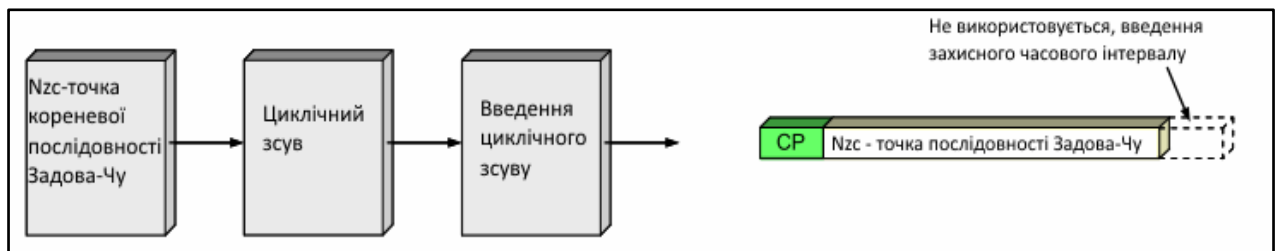


Рисунок 2.14 – Утворення преамбули випадкового доступу

Механізм випадкового доступу LTE дозволяє підбор рівня потужності, опираючись на невдалі спроби передачі преамбули: підвищення рівня потужності із кожною невдалою спробою. Потужність першою спроби передачі преамбули обирається рівною початковому рівню передачі по PRACH. У більшості випадків, цього значення потужності вистачає для успішного проведення процедури випадкового доступу. Однак, якщо процедура випадкового доступу проходить без успіху (фіксується помилка детектування преамбули випадкового доступу на другому із чотирьох етапів випадкового доступу) рівень потужності передачі преамбули збільшується на значення, яке заздалегідь конфігурується для даного мобільного терміналу, для зменшення ймовірності не успішної спроби проведення процедури випадкового доступу.

Оскільки, в загальному випадку, преамбула випадкового доступу є ортогональною до користувацьких даних, необхідність контролю потужності каналу випадкового доступу для зменшення внутрішньо стільникової інтерференції є практично відсутньою, на відміну від інших технологій із не ортогональним випадковим доступом. Потужність сигналу обміну даними мобільного терміналу, здебільшого, підбирається еквівалентною потужності передачі преамбули випадкового доступу, передача якої була успішною. Даний підхід до керування є вигідним із точки зору затримки у передачі.

Обробка сигналів приймачем базової станції специфічна, однак введення циклічного префіксу до них робить можливим відносно простий процес обробки сигналів у частотній області. Зразки сигналів на прийомі БС накопичуються та перетворюються у часове представлення шляхом швидкого перетворення Фур'є. Тривалість кожного зразка дорівнює 0,8 мс, що відповідає тривалості послідовності Задова-Чу без врахування циклічного префіксу. Це дозволяє контролювати неоднорідність сигналу в межах 0,1 мс, що відповідає тривалості захисного часового інтервалу, описаного вище, у базовій конфігурації преамбули.

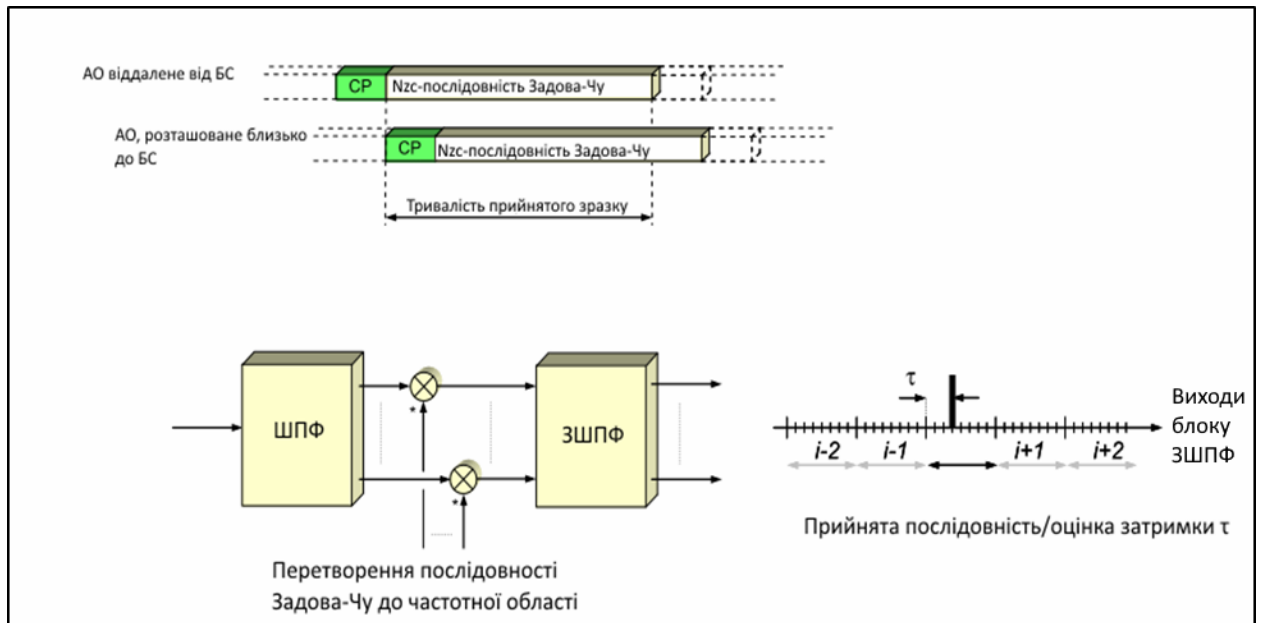


Рисунок 2.15 – Детектування преамбули випадкового доступу у частотній області

На виході блоку ШПФ отримують прийнятий зразок у частотній області, мультиплексують із послідовністю Задова-Чу, після чого на виході блоку отримують цільний зразок прийнятого сигналу у частотній області. Літерою «і» позначають відліки зразків сигналу у частотній області на виході блоку ЗШПФ. Такий підхід є доцільним з точки зору простоти розрахунків в процесі ЗШПФ, що дозволяє одночасно детектувати сигнали по PRACH від декількох абонентських пристроїв одночасно.

У відповідь на детектовану спробу підключення по PRACH, мережа, на другому етапі процедури випадкового доступу, передає по каналу DL-SCH повідомлення, яке містить:

- інформацію про те, від якого саме пристрою була отримана преамбула та якому надається відповідь.
- корекцію часового інтервалу передачі, розраховану приймачем випадкового доступу.
- смугу частот, у якій абонентський пристрій має надсилати повідомлення на третьому етапі процедури випадкового доступу.

- тимчасовий ідентифікатор абонентського пристрою, TC-RNTI (Temporary Cell Radio Network Temporary Identity), який використовується для встановлення з'єднання між мобільним терміналом та мережею.

Якщо базова станція отримує заявки на випадковий доступ від декількох абонентських пристроїв одночасно, то відповідь на них може бути скомбінована у одне повідомлення. Тому передача такого повідомлення планується по DL-SCH та приписується відповідному PDCCH, використовуючи ідентифікатор RA-RNTI (Random-Access Radio Network Temporary Identity). Використання RA-RNTI є необхідним, якщо абонентський пристрій на даному етапі не має виданого ідентифікатора C-RNTI (Cell Radio Network Temporary Identity). По каналах контролю L1/L2 для випадкового доступу постійно детектується сигнал, що надходить із ефіра на наявність заявок на проведення процедури випадкового доступу. Конкретний часовий інтервал надання відповіді на заявки від абонентських пристроїв не визначається специфікацією до побудови мереж LTE. Це дозволяє налаштовувати обладнання базових станцій більш гнучко. Якщо абонентський термінал не може детектувати відповідь на подану заявку, то дана спроба буде вважатися не успішною, а спроба підключення повторюватися, ймовірно, із збільшенням потужності передавача для випадкового доступу останнього. Якщо абонентські термінали, які підключаються до мережі по одному й тому самому каналу випадкового доступу, використовують різні преамбули, виникнення колізій виключене як таке. Однак, в разі, якщо абонентські термінали використовують однакову послідовність в якості преамбули, виникне колізія, що зробить час підключення до мережі довшим через перетікання процесу виправлення даної проблеми. Через те, що ймовірність помилки все-таки існує, алгоритм ARQ, наприклад, не працює для передачі відповіді на заявки до випадкового доступу. Якщо автоматичний повторний запит передачі відповіді (ARQ) працював би, то абонентський термінал, який би отримував відповідь,

призначену іншому пристрою, виконував би передачу повідомлень у неправильно встановлений часовий інтервал. Це призводило б до обриву з'єднання. На другому етапі процедури випадкового доступу абонентському пристрою виділяється часовий інтервал, у якому він буде проводити передачу повідомлень на третьому етапі. В разі, якщо вже було встановлене радіо з'єднання для передачі даних, абонентський термінал буде використовувати часовий інтервал для передачі, який вже був виділений.

Після другого етапу процедури випадкового доступу радіо з'єднання у напрямку Uplink абонентського пристрою синхронізоване. Однак, до початку обміну даними «від базової станції – до користувача», абонентському терміналу має бути приписаний ідентифікатор C-RNTI (якщо він ще не приписаний). В залежності від режиму роботи мобільного терміналу, можлива необхідність обміну додатковою інформацією із базовою станцією.

На третьому етапі абонентський термінал надсилає на базову станцію необхідну інформацію, використовуючи UL-SCH, визначений йому на другому етапі. Передача спеціальних повідомлень на базову станцію у традиційний спосіб (так само, як відбувається передача користувацької інформації) замість додавання її до преамбули є вигідним підходом із декількох причин. По-перше, кількість інформації, переданої із відсутньою синхронізацією, мінімізується, зменшується потреба у збільшенні тривалості захисних інтервалів між повідомленнями. По-друге, використання «нормальної» схеми передачі у напрямку Uplink дозволяє підібрати смугу частот та тип модуляції відповідно до радіо умов на трасі розповсюдження. По-третє, з'являється можливість використовувати алгоритм ARQ. Остання причина є значущою, оскільки вона дозволяє підключатися мобільним терміналам до мережі навіть за відносно нестабільного радіо покриття та зберігати електроенергію, яку витрачає базова станція на підсилення тракту передачі у напрямку Downlink, і збільшує ймовірність успішної передачі повідомлень абонентським пристроєм.

Важливою складовою повідомлення у напрямку до базової станції є те, що до його складу входить ідентифікатор мобільного терміналу, оскільки завдяки цьому ідентифікатору успішно працює механізм підтвердження підключення абонентського обладнання до базової станції. Якщо абонентський термінал працює у режимі RRC_CONNECTED, тобто підключений до відомого йому стільника, має виділений C-RNTI, цей ідентифікатор надсилається ним у повідомленні по Uplink до базової станції. У іншому випадку, використовується Core-Network ідентифікатор пристрою, а базова станція залучає Core-Network до відповідних дій із цього приводу.

Спеціальний скремблінг – код використовується абонентським пристроєм для передачі по UL-SCH. Однак, скремблінг не може базуватися на C-RNTI, оскільки мобільний термінал ще остаточно не отримав C-RNTI. Замість цього ідентифікатора використовується TC-RNTI.

Останній етап процедури випадкового доступу складається із повідомлення у напрямку Downlink, яке містить згоду на встановлення з'єднання. Варто відзначити, що на якщо другому етапі процедури декілька абонентських пристроїв виконували випадковий доступ в межах того самого каналу PRACH, використовуючи однакову послідовність в якості преамбули, отримали одну й ту саму відповідь та тимчасовий ідентифікатор пристрою. Відповідно, на четвертому етапі надається згода або відхилення підключення до мережі через канал випадкового доступу. Механізм надання згоди або відхилення працює дещо по-різному, залежно від того надано C-RNTI пристрою чи ні. Протягом третього етапу процедури обслуговуюча базова станція запам'ятовує отримане у напрямку Uplink повідомлення про наявність у пристрою C-RNTI. Якщо абонентський пристрій вже має виділений C-RNTI, то йому надається відповідний PDCCH. Якщо в процесі детектування C-RNTI пристрою по PDCCH буде успішним, то немає необхідності надсилати йому відповідь про не успішну спробу по DL-SCH. Оскільки ідентифікатор C-RNTI є унікальним для кожного пристрою, решта пристроїв ігнорують надану відповідь про успішну спробу проведення

процедури випадкового доступу. Якщо пристрій не має відповідного приписаного йому C-RNTI, то він отримає повідомлення про відхилення проведення процедури по каналу DL-SCH у відповідності із наданим йому TC-RNTI. Абонентський пристрій порівнює ідентифікатор у повідомленні із ідентифікатором, переданим на третьому етапі. Тільки той пристрій, який вирахає відповідність між ідентифікаторами третього та четвертого етапу, отримає згоду на завершення процедури випадкового доступу та включить TC-RNTI із другого етапу до складу C-RNTI. Тільки коли синхронізація із базовою станцією вже встановлена, алгоритм ARQ уведений у дію відносно напрямку Downlink, знайдена відповідність між повідомленнями третього та четвертого етапів, абонентський пристрій звітує базовій станції про підтвердження успішного проведення процедури випадкового доступу.

Абонентські пристрої, які не отримали відповідь по PDCCCH із їхнім C-RNTI або не вираховували відповідність між ідентифікаторами третього та четвертого етапів, отримують відмову у проведенні процедури випадкового доступу та мають починати її з початку, із першого етапу. Зворотній зв'язок ARQ цими пристроями не передається.

2.7 Частотно-часова структура сигналу OFDMA

На фізичному рівні (на радіо інтерфейсі підсистеми радіо доступу E-UTRAN) в мережі E-UTRAN використовують технологію OFDMA з модуляцією ФМ-4, КАМ-16 та КАМ-64. При цьому, максимальне число піднесучих в робочій смузі частот складає 1200. Для взаємної синхронізації E-UTRAN та UTRAN використовують тактування з тривалістю часової одиниці $T_s = 1/(15000 \cdot 2048)$ с. Передача по радіоканалу відбувається кадрами тривалістю 10 мілісекунд, що дорівнює $307200 T_s$. Блок-схема передавача та приймача сигналів OFDMA представлена на рис. 2.16.

Базова станція передає потоки інформаційних біт на три різні абонентські термінали. eNodeB модулює кожен бітовий потік незалежно від

інших, використовуючи різні схеми модуляції для кожного абонентського термінала. Після цього, кожен бітовий потік проходить через перетворювач послідовного коду у паралельний, для розділення на піднесучі. Кількість піднесучих, яка виділяється кожному абонентському терміналу, залежить від того, яка пропускна здатність потрібна для надання потрібних його користувачу сервісів. Наприклад, для передачі даних голосових сервісів може бути достатньо декількох піднесучих, у той час, як сервіси відео трансляції потребують у декілька разів більшого частотного ресурсу.

Планувальник розподілу ресурсних елементів отримує бітові потоки, які призначені кожному з абонентів та обирає піднесучі, на яких передавати їх. Обрані піднесучі можуть лежати у суміжних або різних ресурсних блоках. Останніми параметрами є рівень та фаза кожної піднесучої, як функції частоти. Після проведення зворотного швидкого перетворення Фур'є, розраховується фаза та квадратурні компоненти, відповідно, у часовій області, для розміщення елементів послідовного коду у паралельний за результатами перетворення Фур'є. Після введення циклічного префіксу результуючий сигнал накладається на несучу для передачі у аналоговій формі.

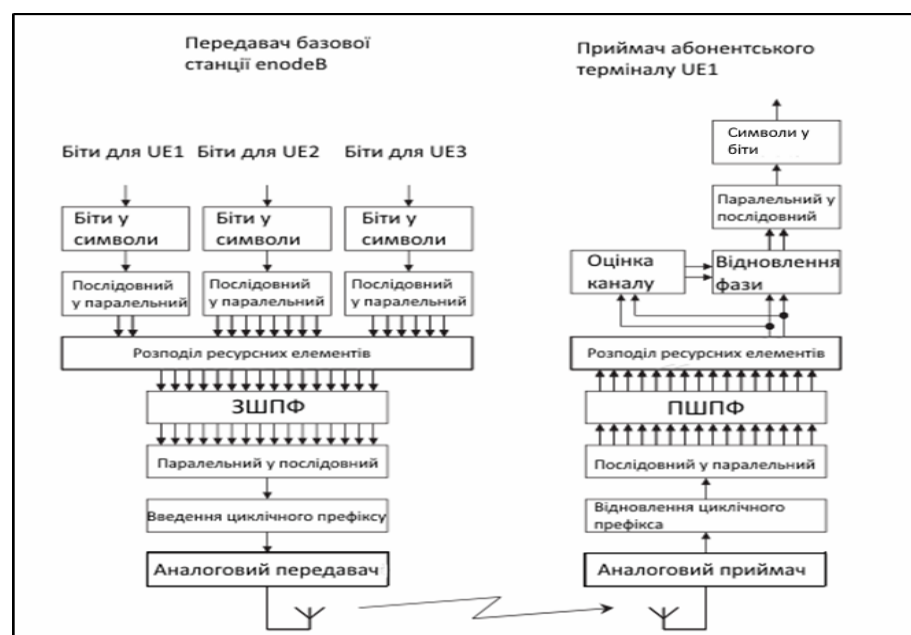


Рисунок 2.16 – Блок-схема приймача та передавача OFDMA

Абонентський термінал виконує зворотні до базової станції операції. Він аналізує сигнал, який надходить від приймача, фільтрує його. Після цього відновлює циклічний префікс та проводить пряме швидке перетворення Фур'є, для відновлення амплітуди і фази кожної піднесучої. Після оцінки каналу та відновлення фази мобільний термінал відновлює передані йому біти та переміщує їх на вищі рівні моделі OSI. Розрізняють дві структури радіо кадру: кадри для роботи у частотному дуплексі (FDD) та кадри для роботи у часовому дуплексі (TDD). Структура кадру FDD наведена на рис. 2.17. Кадр складається з 20 часових слотів тривалістю $15360 T_s = 0,5$ мілісекунд кожен, пронумерованих від 0 до 19. Два послідовних слоти складають 1 субкадр – всього 10 субкадрів, пронумерованих від 0 до 9.

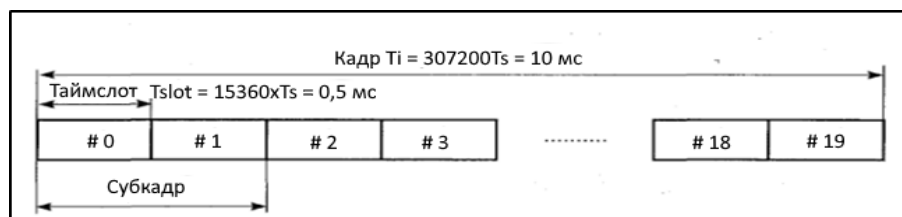


Рисунок 2.17 – Структура радіо кадру в режимі FDD

Структура радіо кадру при часовому дуплексі наведена на рис. 2.18.

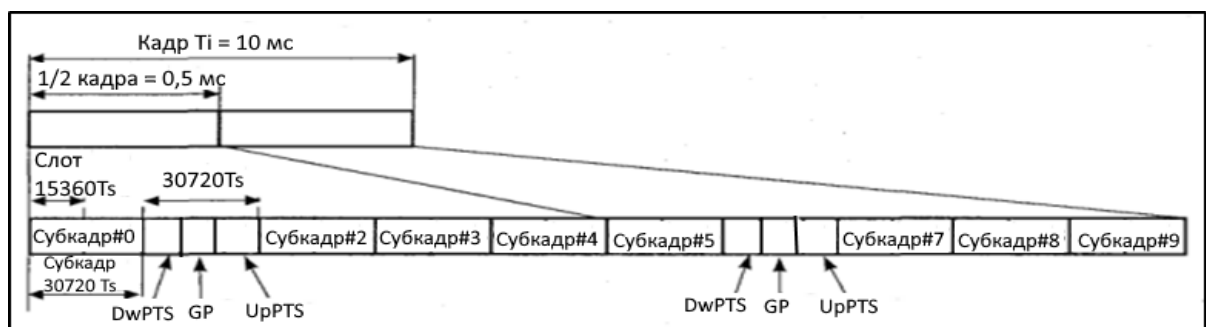


Рисунок 2.18 – Структура радіо кадру в режимі TDD

Кадр тривалістю 10 мс також складається із 10 субкадрів тривалістю 1 мілісекунда. Однак, на відміну від режиму частотного дуплексу, в деяких

субкадрах відбувається передача від базової станції до абонента, по Downlink (D), в інших – від абонента до базової станції, по Uplink (U). Крім того, в структурі радіо кадру присутні спеціальні субкадри, які складаються з трьох полів: UpPTS (Uplink Pilot Timeslot) – поля початку передачі по Uplink, DwPTS (Downlink Pilot Timeslot) – поля початку передачі по Downlink та захисного інтервала – GP (Guard Period). Можна зробити висновок, що у субкадрах 0 та 5 завжди відбувається передача по Downlink, в субкадрі 2 – передача по Uplink, а субкадр 1 є спеціальним: він є тригером переключення напрямку передачі.

Перейдемо до частотно – часових характеристик фізичного стандарту E-UTRA. При відстані між під несучими $\Delta F=15$ кГц довжина OFDMA – символу складає $1/\Delta F=66,7$ мікросекунд. У кожній частині субкадру (слоті тривалістю 0,5 мс) передають 6 або 7 OFDMA – символів, залежно від тривалості циклічного префіксу, CP (Cyclic Prefix) – паузи між радіо кадрами, до складу якої входить перший символ переданої послідовності, що дозволяє компенсувати між символну інтерференцію. Довжина циклічного префікса складає $T_{CP} = 160 T_s = 5,2$ мкс перед першим символом та $144 T_s$ перед рештою символів. Можливий і варіант використання розширеного циклічного префікса (Extended Cyclic Prefix) довжиною $512 T_s = 16,7$ мкс. В такому випадку, в одному субкадрі розміщують 6 OFDMA – символів. Залежно від того, який циклічний префікс використовується, можливі 9 конфігурацій спеціального субкадру, S, при часовому дуплексі.

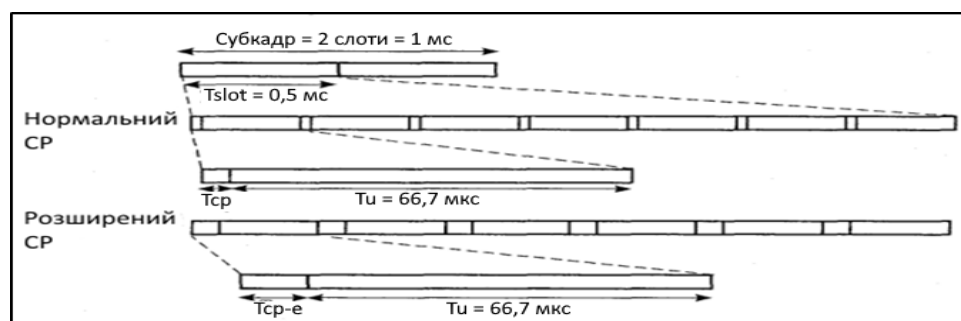


Рисунок 2.19 – Структури субкадру при нормальному та розширеному циклічному префіксі

Як зазначалося раніше, в частотній області відстань між піднесучими обрана рівною $\Delta F=15$ кГц (опціонально, 7,5 кГц). Вибір $\Delta F=15$ кГц забезпечує взаємну синхронізацію пристроїв UMTS та LTE. Так при кількості піднесучих $N = 256$ тактова частота $B = N / T_s = N * \Delta F = 3,84$ МГц, що співпадає із чіповою швидкістю в мережах UMTS.

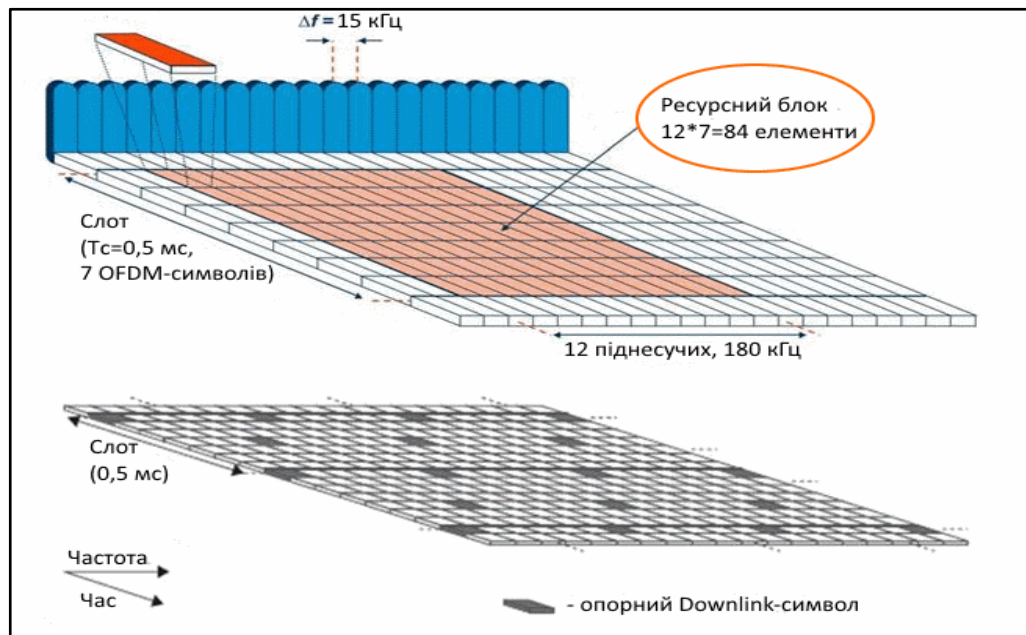


Рисунок 2.20 – Структура ресурсного блока у Downlink

Увесь каналний ресурс розділяють на ресурсні блоки (РБ). Ресурсний блок складається з 12 суміжних піднесучих, по 15 кГц на кожную, які сумарно займають 180 кГц, та одного часового слота (7 або 6 OFDMA – символів на інтервалі 0,5 мс). Кожен OFDMA – символ є ресурсним елементом (РЕ); його характеризують два параметри $\{k;l\}$, де k -номер піднесучої, l -номер символа в ресурсному блоці. При передачі по Downlink, від eNodeB до UE, в кожному блоці з $12*7=84$ РЕ частину ресурсних елементів використовують для передачі опорних символів (Рис. 28). Виділений каналний ресурс характеризують числом ресурсних блоків або груп ресурсних блоків.

Реальна швидкість передачі даних зменшується через передачу опорних символів та сигналів керування. Опорні символи використовують для організації когерентної демодуляції та оцінки каналів. При передачі по

Downlink на базовій станції можуть працювати до 4 антен. При цьому, кожній антені виділені фіксовані ресурсні елементи для передачі опорних символів. Розташування опорних символів в ресурсному блоці відображено на рис. 2.21. Символи, позначені R0, передає антена 0; символи R1-антена 1; символи R2-антена 2; символи R3-антена 3. Зниження пропускнуої здатності ресурсного блоку через передачу опорних символів наведено у табл. 2.6 [6].

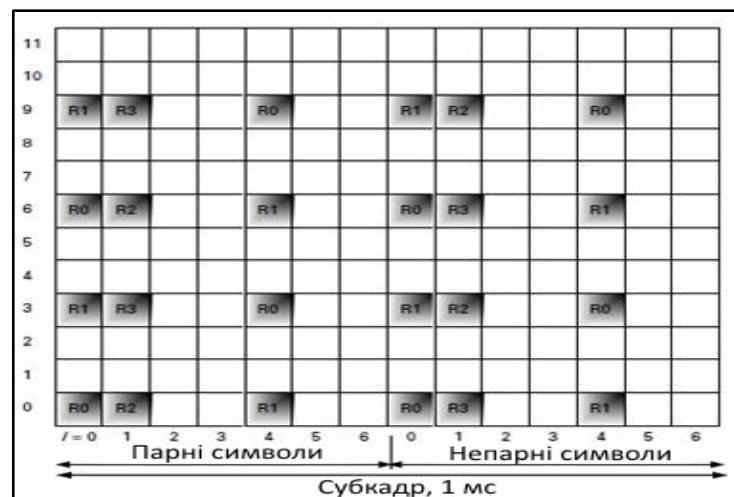


Рисунок 2.21 – Позиціонування опорних символів в ресурсному блоці
Downlink

При виділенні каналного ресурсу для Uplink використовують ті самі поняття ресурсного блоку (12 піднесучих по 15 кГц в слоті), та субкадрів тривалістю 1 мс із 7 або 6 OFDMA-символами в кожному слоті.

Таблица 2.6

	Нормальний CP	Розширений CP
1 передавальна антена	4,76	5,56
2 передавальні антени	9,52	11,11
4 передавальні антени	14,29	15,87

Базова станція може передавати дані на декілька мобільних терміналів одночасно, розподіляючи призначені їм дані у різних групах піднесучих.

Процес вибору під несучих планувальником залежить від наявності завмирань у каналі.

В свою чергу, сигнал, прийнятий від абонентського обладнання, – це функція від частоти. При використанні OFDMA, смуга частот розділяється на піднесучі, тому мобільний термінал може вимірювати потужність прийнятого сигналу опорних символів кожного з ресурсних блоків. Абонентський термінал може групувати виміри сусідніх піднесучих та може надсилати результати вимірів на базову станцію, використовуючи сигнали зворотного зв'язку, більш відомий, як коефіцієнт якості каналу – CQI (Channel Quality Indicator).

Базова станція використовує CQI для двох цілей. По-перше, базова станція може передавати дані користувачам, на піднесучих, сигнал яких на прийомі є найбільш якісним.

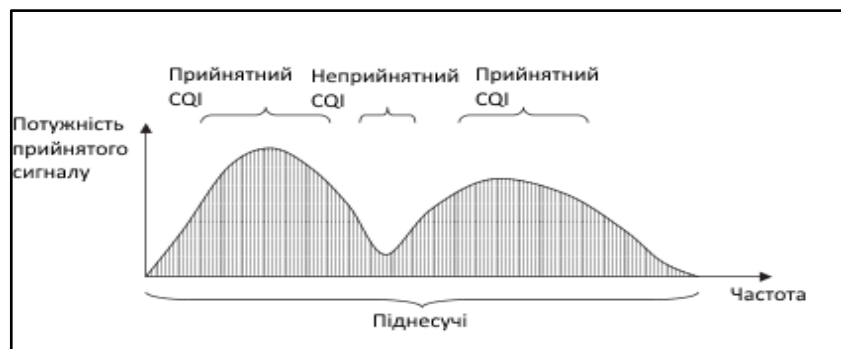


Рисунок 2.22 – Розподіл під несучих за рівнем CQI у OFDMA

Ті піднесучі, які не досить бажані для обміну даними із одними абонентськими пристроями є цілком придатними для передачі даних іншим абонентським терміналам, оскільки модель завмирань у каналі між базовою станцією та користувацьким обладнанням так чи інакше індивідуальна для кожного абонентського терміналу.

Передача радіо сигналів на високій швидкості в умовах багатопроменевого розповсюдження призводить до міжсимвольної інтерференції – ISI (Inter-Symbol Interference). Наприклад, якщо швидкість

передачі даних складає 120 кбіт/с, а затримка складає 3,33 мкс, то рівень між символної інтерференції на приймачі може становити до 40%. Це приводить до інтерференції та бітових помилок на приймачі.

Якщо передача даних ведеться на декількох різних, не суміжних, під несучих із використанням OFDMA, тоді швидкість передачі даних на кожній окремій піднесучій у декілька разів менше, а тривалість окремого символу стає вищою. Такий підхід значно зменшує рівень між символної інтерференції. На рис. 2.23 представлений OFDMA – сигнал, розподілений між вісьмома під несучими, тобто символна швидкість кожної піднесучої складає 15 кбіт/с та тривалість символу складає 66,7 мкс. Якщо затримка сигналу буде складати 3,33 мкс, то рівень міжсимвольної інтерференції буде дорівнювати 5%. Даний підхід дозволяє скоротити міжсимвольну інтерференцію до 1/8, порівняно до попереднього рівня та зменшити кількість бітових помилок на приймачі. В разі, якщо кількість піднесучих вище, міжсимвольна інтерференція пропорційно скорочується.

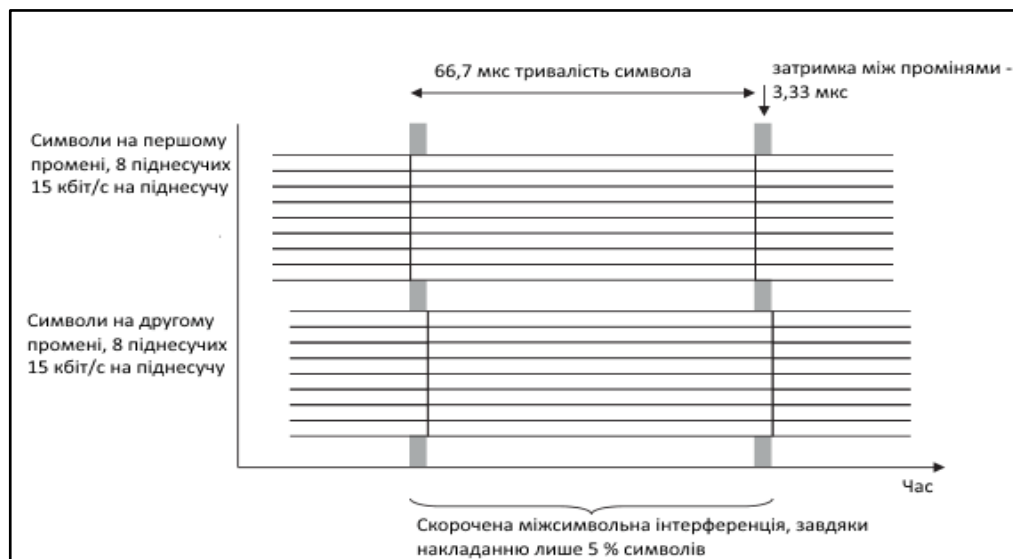


Рисунок 2.23 – Скорочення міжсимвольної інтерференції шляхом передачі на декількох під несучих

Одна базова станція, eNodeB, може обмінюватися даними з великою кількістю мобільних терміналів, використовуючи OFDMA. Тим не менше,

підсистема радіо доступу E-UTRAN містить велику кількість базових станцій, тому один абонентський термінал приймає сигнали обслуговуючої його базової станції із наявністю інтерференції від решти eNodeB. Тому, необхідний такий підхід до побудови E-UTRAN, який би дозволив зменшити рівень інтерференції між БС.

При побудові систем радіо доступу попередніх поколінь, користувалися двома такими підходами. У системах GSM суміжні стільники працюють на різних несучих частотах. В загальному випадку, кожен стільник міг використовувати $\frac{1}{4}$ загальної ширини робочої смуги частот. Ця технологія дозволяє скорочувати рівень інтерференції між суміжними стільниками, однак це призводить до не ефективного використання частотного ресурсу. У мережах UMTS кожен стільник працює на одній і тій самій частоті, із коефіцієнтом повторного використання частот рівним 100%. Ця технологія дозволяє використовувати частотний ресурс більш ефективно, ніж раніше ціною збільшення рівня інтерференції у системі.

У мережах LTE, кожна базова станція може використовувати один і той самий набір піднесучих, однак може розташовувати їх більш гнучко, використовуючи технологію під назвою дробове повторне використання частот. Рисунок 27 показує простий приклад напрямку Uplink мереж LTE, на якому кожна базова станція контролює один стільник. Піднесучі напрямку Uplink розділяються на три групи, під назвами А, Б та В відповідно. Кожна eNodeB планує передачу від конкретного мобільного пристрою, використовуючи один блок піднесучих (блок В у випадку центральної станції) та планує передачу, використовуючи частоти А та Б.

Віддалений від базової станції мобільний термінал має вести передачу із більшою потужністю, задля забезпечення гарантованого прийому його сигналу базовою станцією. Це призводить до появи інтерференції із сусідніми абонентськими терміналами, сигнал від яких надходить з ефіру на тих самих під несучих. Через розподіл частот так, як показано на рис. 2.24, можливе таке планування мережі радіо доступу, щоб базові станції

аналізували спектр тільки у тій частині спектру, у якій працюють абонентські термінали, які знаходяться неподалік. Ці абонентські термінали будуть працювати із малою вихідною потужністю, не маючи негативного впливу на рівень інтерференції у межах даного стільника.

Мережі LTE, також, підтримують технологію динамічного дробового частотного повторного використання, в межах якої суміжні базові станції ведуть передачу даних абонентам, синхронізуючи моменти передачі із суміжними БС через інтерфейс X2.

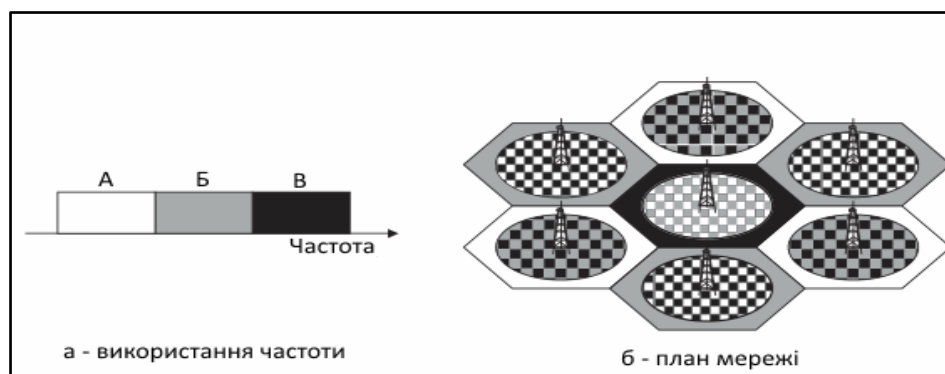


Рисунок 2.24 – Приклад застосування технології дробового повторного використання частот OFDMA: а – використання частотного домену; б – фінальний план мережі

Для передачі по Uplink використовують модифіковану технологію OFDMA, SC-OFDM, тобто фактично організовують передачу широкосмугового сигналу на 1 несучій. Призначенням даного методу є зменшення середньої пікової потужності сигналу, оскільки висока потужність сигналів передачі у мережі радіо доступу є головною вадою технології OFDMA. Блок-схема передавача абонентського терміналу та приймача базової станції, при використанні SC-OFDM, зображена на рис. 2.25.

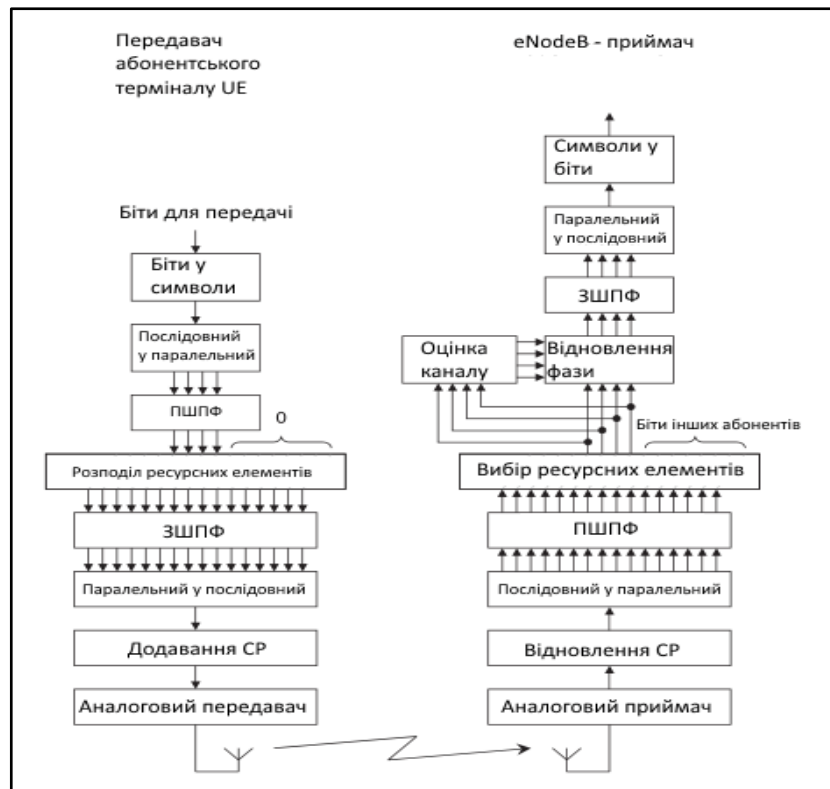


Рисунок 2.25 – Блок-схема SC-FDMA передавача та приймача

Із даної блок-схеми можна виділити дві основних відмінності SC-OFDM від OFDMA. Головною відмінністю є те, що SC-OFDM передавач містить додатковий блок прямого швидкого перетворення Фур'є між блоками перетворення послідовного коду у паралельний та розподілом ресурсних елементів. Даний підхід дозволяє зіставляти символи разом, як цього потребує зменшення потужнісного пік-фактора.

Друга характерна для SC-OFDM риса випливає із того, що дана технологія використовується для напрямку Uplink. Через це передавач мобільного терміналу працює тільки на деяких під несучих спектру Uplink, решта з них є недоступними для нього, оскільки на них ведуть обмін даними інші абонентські термінали, які обслуговуються даним стільником. З рештою, кожним мобільним терміналом використовується блок із суміжних під несучих без «пробілів» між ними. Даний підхід є основою утворюючим у SC-OFDM, оскільки дозволяє стримувати коливання вихідної потужності передавача у мінімально допустимих межах.

Принцип роботи SC-OFDM можна зрозуміти, ознайомившись із трьома етапами обробки сигналів перед їх передачею передачею абонентським терміналом: пряме швидке перетворення Фур'є, розподіл ресурсних елементів, зворотне швидке перетворення Фур'є. На вхід блоку прямого швидкого перетворення Фур'є подається послідовність символів у часовому домені.

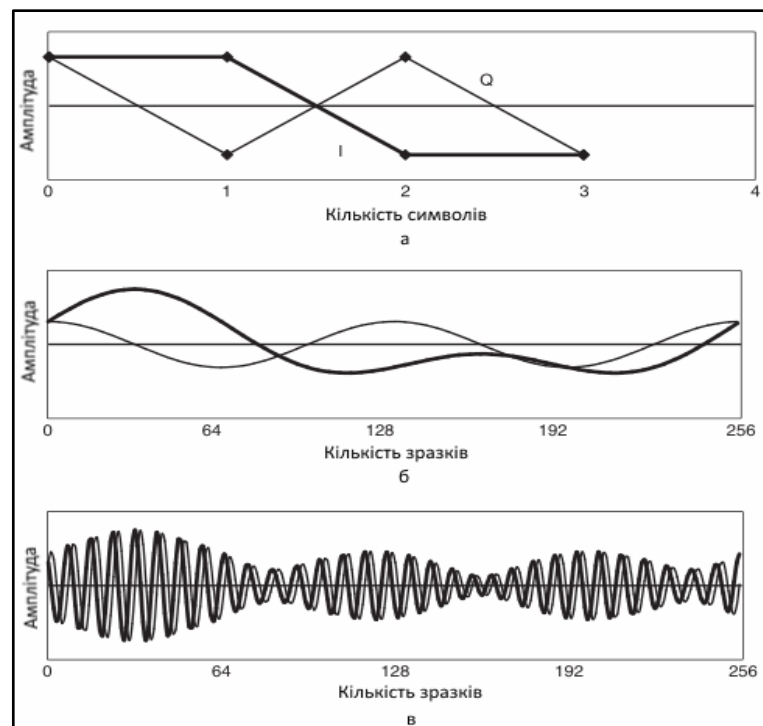


Рисунок 2.26 – Приклад форм сигналів SC-OFDM: а – переданих символів; б – фінальна форма сигналу SC-OFDM, якщо дані передаються на чотирьох центральних під несучих із 256; в – форма сигналу, якщо дані передаються тридцятьма двома під несучими

Даний блок ПШПФ переносить ці символи у частотний домен, розподільник ресурсних елементів переносить їх на центральні частоти виділеного ресурсного блоку, а блок зворотного швидкого перетворення Фур'є переносить їх у часовий домен знову. Дивлячись на вищезгадані операції в цілому, ми можемо бачити, що остаточний варіант сигналу на виході з передавача мобільного терміналу, практично еквівалентний сигналу на

виході модулятора. Сигнал, модульований за допомогою QPSK, має відносно постійний рівень потужності (у разі відсутності додаткових фільтрів радіо сигналу), чого важко досягти у випадку, наприклад, 16QAM або 64QAM. Однак, SC-OFDM повністю вирішує дану проблему та сигнали на виході передавача абонентського обладнання маю відносно постійний рівень потужності, незалежно від типу модуляції.

При прийомі сигналу SC-OFDM над ним проводять операції, зворотні тим, які проводилися перед його передачею. Із метою мінімізації впливу міжсимвольної інтерференції на якість прийому сигналу, між символами розташовують CP. Для побудови LTE специфіковано 6 варіантів смуг частот каналів. В табл. 2.7 приведена максимальна кількість ресурсних блоків в одному часовому інтервалі при передачі по Downlink та Uplink, яка вирізається приймачем абонентського пристрою, для обробки прийнятого сигналу [7].

На мережах LTE широко використовується три основних види модуляції: QPSK, 16QAM, 64QAM. Розглянемо кожен тип більш детально, для розуміння принципів обробки сигналів перед їхнім виведенням в радіо ефір. QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) – квадратурна фазова модуляція. Відмінністю QPSK від інших видів модуляції полягає у тому, що щільність інформації, яка передається за використання даного типу модуляції, у розрахунку на частотну ширину каналу (на один символ чи на один герц) вище за одиницю. Наприклад, чотирьохпозиційна квадратурна фазова модуляція QPSK забезпечує чотири стани фазової модуляції – це два біти на 1 символ. У чотирьохпозиційній фазовій модуляції QPSK використовується чотири значення фази несучого коливання. У цьому випадку фаза сигналу має приймати чотири значення: 0° , 90° , 180° , 270° . Однак, частіше використовуються інші значення фаз: 45° , 135° , 225° , 315° . Приклад часової форми сигналу, модульованого чотирьохпозиційною QPSK наведений на рис. 2.27.

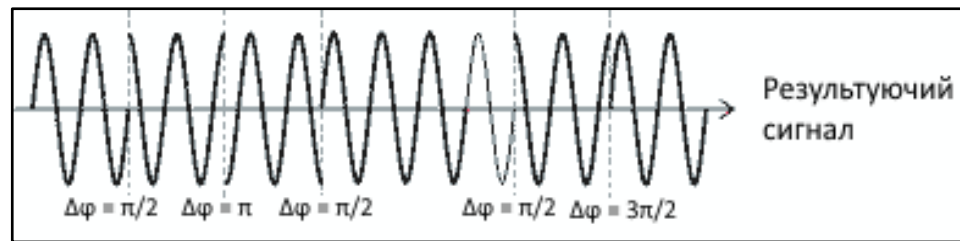


Рисунок 2.27 – Часова форма сигналу, модульованого чотирьохпозиційною QPSK

Модуляція 16QAM є підтипом квадратурної амплітудної модуляції. При застосуванні даного типу модуляції, потік даних, який надходить від кодера до модулятора, розділяється надвоє. Після цього відбувається його накладання на дві несучі, зсунуті одна відносно одної на 90° (безпосередньо через й з'явилася назва «квадратурна»). Наступним етапом є сумування цих двох потоків, задля перетворення їх на аналоговий сигнал. Оскільки кожен із двох цифрових потоків, які надійшли від кодера, переносить 4 символи (00, 01, 10, 11), то сукупно на обох під несучих може передаватися 16 сигнальних точок. Часова форма сигналу, модульованого 16QAM наведена на рис. 2.28 [8].

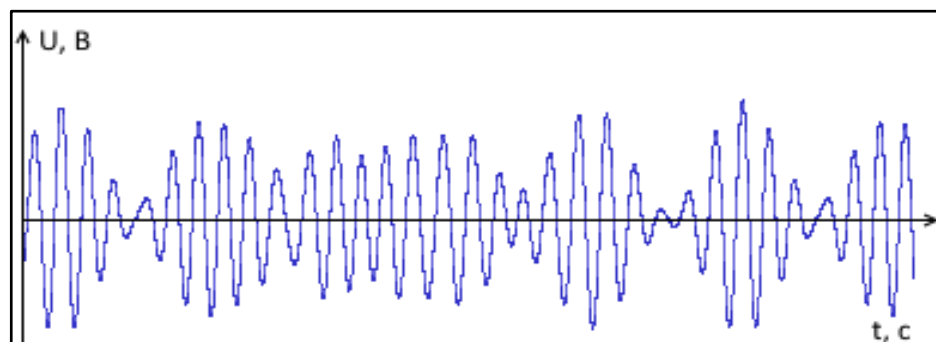


Рисунок 2.28 – Часова форма сигналу, модульованого 16QAM

Модуляція 64QAM є підтипом квадратурної амплітудної модуляції. При застосуванні даного типу модуляції, потік даних, який надходить від кодера до модулятора, розділяється надвоє. Після цього відбувається його накладання на дві несучі, зсунуті одна відносно одної на 90° (безпосередньо

через й з'явилася назва «квадратурна»). Наступним етапом є сумування цих двох потоків, задля перетворення їх на аналоговий сигнал. Оскільки кожен із двох цифрових потоків, які надійшли від кодера, переносить 8 символів, то сукупно на обох під несучих може передаватися 64 сигнальних точки.

Таблиця 2.7

Смуга частот, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Число ресурсних блоків	6	15	25	50	75	100
Смуга в приймачі, МГц	1,08	2,7	4,5	9	13,5	18

2.8 Технологія MIMO та її використання в мережах LTE

Технологія MIMO (Multiple Input – Multiple Output) дозволяє значно збільшити завадостійкість каналів зв'язку, тобто зменшити відносну кількість біт, прийнятих із помилками, без зменшення швидкості передачі даних (наприклад, застосування надлишкових кодів, введення алгоритму автоматичного запиту повторного надсилання повідомлення, прийнятого із помилкою – HARQ) в умовах багатопроменевого поширення сигналів. Застосування технології MIMO спрямоване на вирішення двох задач:

- підвищення якості радіо зв'язку за рахунок часового/просторового кодування та/або формування променів;
- збільшення пропускну здатності, при використанні просторового мультиплексування, поляризаційного розділення каналів.

Для однопроменевого каналу SISO (Single Input – Single Output) справедливий вираз:

$$C_{SISO} = f_g \log(1 + S/N), \quad (2.1)$$

де f_g – ширина спектру сигналу; S/N – відношення сигнал/шум, C_{SISO} – пікова швидкість передачі даних, при заданих f_g та S/N [9].

Подальше збільшення швидкості передачі даних можливе за рахунок збільшення ширини спектру сигналу, збільшення відношення сигнал/шум,

використання багатопозиційних видів модуляції. При використанні технології MIMO пікова швидкість передачі даних визначається виразом:

$$C_{ISO} = M f_g \log(1 + S/N), \quad (2.2)$$

де параметр M залежить від конфігурації MIMO: $M = \min \{M_{\text{прд}}; M_{\text{пр}}\}$, де

$M_{\text{прд}}$ – кількість передавальних антен, $M_{\text{пр}}$ – кількість приймальних антен.

Швидкість передачі даних системи MIMO лінійно збільшується із збільшенням кількості приймальних та передавальних антен. Для несиметричних антенних конфігурацій MIMO (наприклад, 1x2 або 2x1) швидкість передачі даних має логарифмічну залежність:

$$C_{\text{прд/пр.}} = f_g \log(1 + M(S/N)) \quad (2.3)$$

Найбільш широке застосування отримала технологія MIMO на основі просторово – часового кодування, яка увійшла у стандарти 3GPP для мереж мобільного зв'язку (Release 7, 8). Крім того, ця технологія використовується у мережах стандартів не - 3GPP, наприклад, у мережах бездротового широкосмугового зв'язку IEEE [10].

Спрощена схема, яка пояснює алгоритм просторово – часового кодування STC (Space-Time Coding), наведена на рис. 2.29. На даному рисунку відображена передача двома антенами.

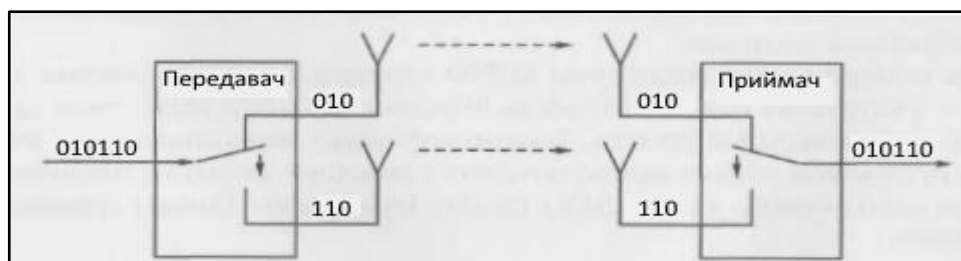


Рисунок 2.29 – Спрощена схема алгоритму STC

Системи зв'язку, які працюють не за технологією MIMO, як правило, використовують, частотний метод розділення каналів. На відміну від них системи зв'язку, які базуються на MIMO із STC, мають велику кількість каналів зв'язку, які працюють на одній частоті. Основна задача технології

MIMO із STC – розділення та вирівнювання (еквалайзинг) сигналів різних каналів [11]. У цьому випадку, модель лінії зв'язку (розповсюдження радіо сигналів) являє собою матрицю H розмірністю $n \times n$, елементами якої є комплексні коефіцієнти передачі (федінги) каналів (елементи головної діагоналі h_{ij} – називають прямими коефіцієнтами, решту - непрямыми). Вектор сигналу передавальної антени позначають символом d , приймальної – r (розмірність вектору $n \times 1$, де n – число приймальних антен). Рівняння спостереження системи зв'язку, яка працює за технологією MIMO із просторово – часовим кодуванням, має вигляд:

$$r = Hd + n, \quad (2.4)$$

де n – ($n \times 1$) – вектор адитивних шумів.

Схема формування фізичних сигналів за технологією MIMO зображена на рис. 2.30:

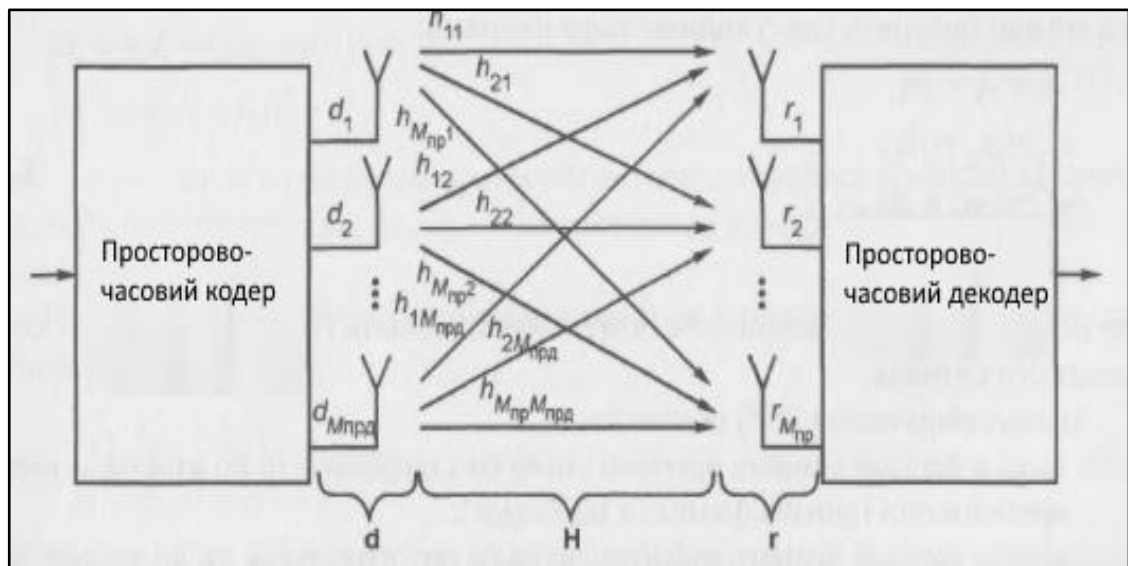


Рисунок 2.30 – Схема формування фізичних каналів мережі згідно із технологією MIMO

Значення матриці H необхідні для алгоритму обробки сигналів на приймальному боці. Комплексні коефіцієнти передавання просторових каналів (федінги) у матриці H визначаються за допомогою передачі навчальної послідовності, заздалегідь відомої на приймальному боці.

Виміряні на приймальному боці фідінги каналів, можуть пересилатися передавальному пристрою для використання при кодуванні, що додатково підвищує ефективність технології MIMO із просторово – часовим кодуванням [12].

Принцип просторово – часового кодування сигналів двома антенами зображений на рис. 2.31, де d_1, d_2 – комплексні сигнали; d_1^*, d_2^* – сигнали, комплексно сполучені із сигналами d_1, d_2 . Матриця отриманих сигналів називається просторово – часовим блоком Аламоуті.

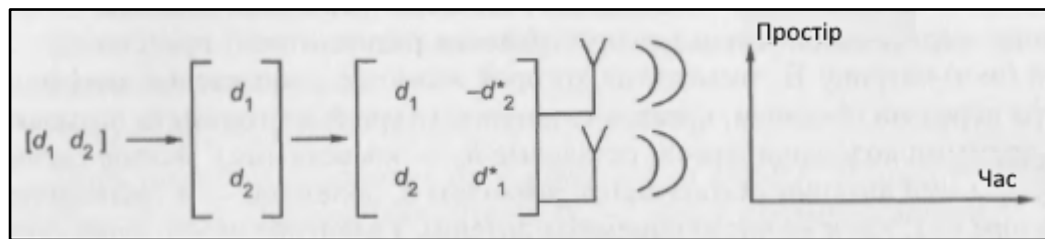


Рисунок 2.31 – Принцип кодування сигналу двома антенами

Принцип кодування блоку Аламоуті полягає у тому, що послідовність передачі розбивається на пари (парні та непарні) d_1, d_2 . Для їхньої передачі потрібні дві антени та два часових інтервали. У першому часовому інтервалі випромінюються сигнали d_1 та d_2 , а у другому - d_1^*, d_2^* . Фізичну сутність формування таких сигналів можна пояснити наступними виразами:

$$\begin{aligned} d_1 &= a_1 + jb_1; \\ d_2 &= a_2 + jb_2; \\ -d_2^* &= -a_2 + jb_2; \\ d_1^* &= a_1 - jb_2, \end{aligned} \quad (2.5)$$

де a_i, b_i – відповідно дійсна та уявна складова i – го комплексного сигналу.

Аналіз виразу (5) показує:

- якщо у перший момент часу сигнали синфазні, то у другий момент вони протифазні;
- якщо у перший момент часу сигнали ортогональні, то у другий вони також ортогональні.

Оскільки напрямок випромінювання двоантенної системи залежить від співвідношення фаз сигналів на її антенах (елементах), то напрямки сумарного випромінювання пар сигналів у різні моменти часу будуть різними. Ця властивість може погіршити проходження сигналу при складних умовах розповсюдження у відсутності прямої видимості. Пряма видимість визначається відсутністю перешкод для розповсюдження у просторових областях (зонах Френеля).

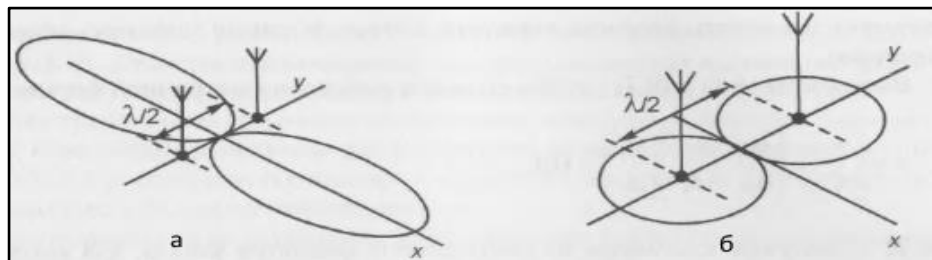


Рисунок 2.32 – Напрямки сумарного випромінювання двоелементної системи (λ – довжина хвилі): а – синфазне живлення випромінювачів; б – протифазне живлення випромінювачів

Для прийому сигналу, кодованого блоком Аламоуті, достатньо однієї антени. У такому випадку, кажуть про технологію MISO (Multiple Input – Single Output), яка є підкласом технології MIMO. Сигнал на вході приймальної антени визначається наступним виразом:

$$\begin{cases} r_1 = h_1 d_1 + h_2 d_2 + n_1, \\ r_2 = -h_1 d_2 + h_2 d_1 + n_2, \end{cases} \quad (2.6)$$

де r_1, r_2 – сигнали на вході приймальної антени у перший та другий моменти часу відповідно; h_1, h_2 – комплексні коефіцієнти передачі каналу.

На приймальному пристрої, на основі прийнятих сигналів r_1 та r_2 отримують дві лінійні комбінації:

$$\begin{cases} d'_1 = h_1 r_1 + h_2 r_2, \\ d'_2 = h_2 r_1 - h_1 r_2. \end{cases} \quad (2.7)$$

Фізичну сутність підвищення завадостійкості при використанні технології МІМО можна пояснити, зіставивши вирази, отримаємо:

$$\begin{cases} d'_1 = (|h_1|^2 + |h_2|^2)d_1, \\ d'_2 = (|h_1|^2 + |h_2|^2)d_2. \end{cases} \quad (2.8)$$

Аналіз виразу (8) показує, що енергія сигналу збільшується пропорційно квадрату модулів федінгів каналу. Збільшення енергії дозволяє збільшити швидкість передачі даних у каналі (згідно із теоремою Шеннона).

Вирази (6) та (7) зручно записати у векторно – матричній формі:

$$r = \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2 & -h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} = Hd \quad (2.9)$$

де H – матриця, яка складається із комплексних федінгів каналу, для якої справедливе співвідношення:

$$H^{*T}H = (|h_1|^2 + |h_2|^2)I = ||h||, \quad (2.10)$$

де $||h||$ - сума квадратів модулів усіх федингів каналу; I – одинична матриця.

На основі виразів (9) та (10) можна записати:

$$d' = H^{*T}r \quad (2.11)$$

Схема утворення сигналів при просторово – часовому кодуванні згідно (11) наведена на рис. 2.33.

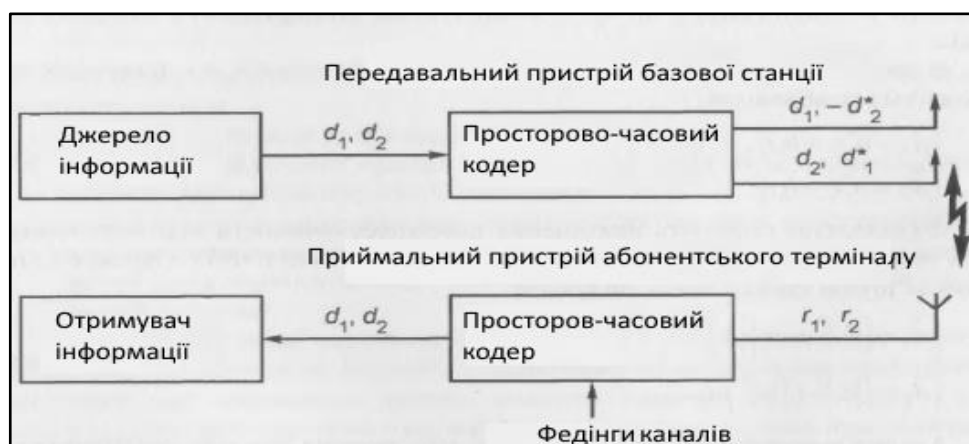


Рисунок 2.33 – Схема утворення сигналів при просторово – часовому кодуванні

Вираз (11) являє собою векторно – матричний запис виразу (8). Зручність використання векторно – матричних виразів полягає у тому, що їхній вигляд не залежить від кількості приймально – передавальних антен.

Просторово – часове кодування визначає порядок формування сигналів на передачі для різного числа приймально – передавальних антен. Далі представимо порядок формування сигналів для двох, трьох та чотирьох антен.

Для основаної на технології MIMO системи зв'язку із двома передавальними антенами (A_1 та A_2) та двома (однією) приймальними антенами порядок формування має наступний вигляд:

$$\begin{matrix} A_1 & d_1 & -d_2^* \\ A_2 & d_2 & d_1^* \end{matrix} \quad (2.12)$$

Для системи із трьома передавальними антенами порядок формування має наступний вигляд:

$$\begin{matrix} A_1 & d_1 & -d_2 & -d_3 & -d_4 & d_1^* & -d_2^* & -d_3^* & -d_4^* \\ A_2 & d_2 & d_1 & d_4 & -d_3 & d_2^* & d_1^* & d_4^* & -d_3^* \\ A_3 & d_3 & -d_4 & d_1 & d_2 & d_3^* & -d_4^* & -d_1^* & d_2^* \end{matrix} \quad (2.13)$$

Для системи із чотирма передавальними антенами порядок формування сигналів має наступний вигляд:

$$\begin{matrix} A_1 & d_1 & -d_2 & -d_3 & -d_4 & d_1^* & -d_2^* & -d_3^* & -d_4^* \\ A_2 & d_2 & d_1 & d_4 & -d_3 & d_2^* & d_1^* & d_4^* & -d_3^* \\ A_3 & d_3 & -d_4 & d_1 & d_2 & d_3^* & -d_4^* & d_1^* & d_2^* \\ A_4 & d_4 & d_3 & -d_2 & d_1 & d_4^* & d_3^* & -d_2^* & d_1^* \end{matrix} \quad (2.14)$$

Із розглянутих виразів випливає, що максимальна символна швидкість передачі сигналів, рівна 1 (два сигнали d_1 та d_2 передаються за два інтервали часу), відповідає системі із двома передавальними антенами. Для варіантів із трьома та чотирма передавальними антенами символна швидкість передачі сигналів дорівнює $\frac{1}{2}$ (чотири сигнали $d_1 - d_4$ передаються за вісім часових інтервалів).

Наведемо вирази для матриці H комплексних федінгів каналу, які потрібно використовувати на приймальному пристрої для розглянутих схем передачі (13) та (14). Для трьох передавальних антен:

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & 0 \\ h_2 & -h_1 & 0 & -h_3 \\ h_3 & 0 & -h_1 & h_2 \\ 0 & h_3 & -h_2 & -h_1 \\ h_1^* & h_2^* & h_3^* & 0 \\ h_2^* & -h_1^* & 0 & -h_3^* \\ h_3^* & 0 & -h_1^* & h_2^* \\ 0 & h_3^* & -h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Для чотирьох передавальних антен:

$$H = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 & h_4 \\ h_2 & -h_1 & h_4 & -h_3 \\ h_3 & -h_4 & -h_1 & h_2 \\ h_4 & h_3 & -h_2 & -h_1 \\ h_1^* & h_2^* & h_3^* & h_4^* \\ h_2^* & -h_1^* & h_4^* & -h_3^* \\ h_3^* & -h_4^* & -h_1^* & h_2^* \\ h_4^* & h_3^* & -h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Порівнюючи наведені матриці (15) та (16), можна зробити висновок, що система зв'язку на основі технології MIMO із просторово – часовим кодуванням, яка має три передавальних антени, для якої $h_4 = 0$, являє собою зсичений варіант тієї самої системи із чотирма передавальними антенами. І в тому, і в іншому (8×1) – вектор має наступний вигляд:

$$r^T = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ r_4 \ r_1^* \ r_2^* \ r_3^* \ r_4^*] \quad (2.17)$$

Ступінь виграшу у завадо захищеності при збільшенні числа антен системи зв'язку на основі технології MIMO із STC визначають співвідношенням:

$$d' = ||h|| = d \sum_{m=1}^M |h_m|^2, \quad (2.18)$$

яке показує, що потужність сигналу на виході приймача системи зв'язку на основі технології MIMO із STC дорівнює сумі потужностей, які надходять у приймач від усіх передавальних антен [13]. Таким чином, при рівних федінгах каналів виграш у завадо захищеності пропорційний числу антен.

Узагальнена структурна схема системи зв'язку, основаної на технології MIMO із STC представлена на рис. 2.34. У відповідності із цією схемою, потік послідовних інформаційних сигналів за допомогою демультимплексора розділяється на $N_{\text{прд}}$ паралельних під потоків. Кожен під потік кодується просторово – часовим кодом та після модуляції випромінюється у простір відповідною антеною. Вектор прийнятих сигналів являє собою добуток матриці каналу на вектор випромінених сигналів.



Рисунок 2.34 – Узагальнена структурна схема системи зв'язку, яка базується на технології MIMO із STC

2.9 Висновки з розділу 2

У цьому розділі були розглянуті базові принципи побудови та функціонування підсистеми радіо доступу мереж LTE. З'ясовано, які типи каналів виділяються на мережах даного типу, яку роль вони виконують. Висвітлено положення щодо особливостей обміну даними між абонентським терміналом та базовою станцією як у напрямку Downlink, так і у напрямку Uplink.

Була розглянута структура сигналів технологій множинного доступу OFDMA та SC-OFDM, структура радіо кадру, різноманітні конфігурації радіо

кадрів у режимі часового дуплексу. Визначені основні типи модуляції, за допомогою яких корисна інформація накладається на несучу частоту.

У даному розділі, крім того, була розглянута технологія MIMO, мета та перспективи її застосування на мережах LTE. Визначені основні положення щодо просторово-часового мультиплексування. Зроблені висновки з приводу того, який вииграш дає операторам мережі радіо доступу використання технології MIMO.

ВИСНОВКИ

Відповідно до технічного завдання була розглянута та проаналізована структура підсистеми радіодоступу E-UTRAN, її місце та функції у загальній структурі мережі LTE. Розглянуті вимоги до радіоінтерфейсу LTE та проаналізований принцип функціонування підсистеми E-UTRAN та протоколи, що використовуються. Проаналізовані процеси, що відбуваються при передачі даних від базової станції до абонентського терміналу, та описано яким чином відбувається доступ абонентських терміналів до базової станції. Проаналізовано алгоритм та технічні принципи організації процедури виділення ресурсів абонентському терміналу (процедура RACH). Виконано аналіз методів модуляції та принципів формування радіоканалів за технологією OFDMA. Проаналізовано принципи підвищення ефективності радіопідсистеми за рахунок використання технології MIMO.

Застосування мереж LTE є вигідним та цілком доцільним, виходячи із декількох основних положень. По-перше, застосування технології множинного доступу, OFDMA, дозволяє організувати радіодоступ досить високої якості, оскільки в разі, якщо абонентський термінал звітує про погіршення характеристик радіо каналу, йому може бути наданий інший ресурсний блок частот, із більшою довжиною хвиль, що робить можливим динамічне покращення якості сервісу. По-друге, застосування циклічного префіксу перед кожним символом (фактично його дублювання) зменшує вплив між символної інтерференції, яка виникає внаслідок багатопроменевого поширення радіо хвиль та завмирань на трасі розповсюдження сигналу. По-третє, застосування гібридного алгоритму запиту повторної передачі сильно пошкоджених або втрачених пакетів, дозволяє зменшити час затримки на оброблення прийнятого сигналу та покращити якість обслуговування абонентів. По-четверте, впровадження технології MIMO у поєднанні із типами модуляції високих порядків (16QAM,

64QAM) дозволяє домогтися пропускної здатності більше 100 мбіт/с у напрямку Downlink та 50 мбіт/с у напрямку Uplink.

Даний вид мереж може стати альтернативою провідних мереж доступу у віддалених населених пунктах, завдяки більш високій пропускній здатності, стійкості каналів радіо зв'язку до погіршення умов поширення сигналів. Наразі в Україні планується імплементація мереж LTE у частотному діапазоні 900 МГц. Реалізація даного підходу зробить доступ абонентів, які знаходяться на значній відстані від великих міст, до мережі передачі даних простим у організаційному та фінансовому планах.

Знання та розуміння основних принципів побудови та функціонування мереж LTE дозволяє правильно підходити до їхнього планування та розгортання. Крім того, це дозволяє проводити оптимальну конфігурацію мережевого обладнання, задля спрощення подальшої експлуатації мереж, покращення показників функціонування.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold 4G, LTE-Advanced Pro and The road to 5G – 2016 – Elsevier Ltd – 586 p.
2. F. Mohammed LTE BIBLE – 2018 – Nokia Networks – 306 p.
3. РЫЖКОВ А.Е., Сиверс М.А., Воробьёв В.О., Гусаров А.С., Слышков А.С., Шуньков Р.В. Системы и сети радиодоступа – СПб: Линк, 2012. – 226 с.: ил.
4. A. Sibille, C. Oestges, A. Zanella MIMO from Theory to Implementation – 2011 – Elsevier Ltd – 384 p.
5. MIMO and Smart Antennas for Mobile Broadband Systems – October 2012 – 4G Americas MIMO and Smart Antennas for Mobile Systems – 137 p.
6. A. Mishra Fundamentals of Network Planning and Optimization 2G/3G/4G... Evolution to 5G – 2018 – John Wiley and Sons – 426 p.
7. C. Cox An Introduction to LTE – 2014 – John Wiley and Sons – 486 p.
8. A. Elnashar, M. El-saidny, M. Sherif Design, Deployment and Performance of 4G – LTE Networks – 2014 – John Wiley and Sons – 609 p.
9. J. Acharya, L. Gao, S. Gaur Heterogeneous Networks in LTE-Advanced – 2014 – John Wiley and Sons – 294 p.
10. E. Metsala, J. Salmelin LTE Backhaul Planning and Optimization – 2016 – John Wiley and Sons – 310 p.
11. S. Bahrenburg LTE from A – Z – Technology and Concepts of the 4G 3GPP Standard – 2008 – INACON GmbH - 366 p.
12. ITU-R Specification M.1801-2.
13. Тихвинский В.О., Тереньев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура – М.: Эко-Трендз, 2010 – 284 с.:ил.